

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

DIFERENČNÍ STRUKTURY LINEÁRNÍCH OBVODŮ S DDCC A DVCC

DIFFERENTIAL STRUCTURES OF LINEAR CIRCUITS USING DDCCS AND DVCCS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDŘEJ SLÁDOK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JAROSLAV KOTON, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Teleinformatika

Student: Ondřej Sládok
Ročník: 3

ID: 145894
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Diferenční struktury lineárních obvodů s DDCC a DVCC

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Analyzujte stávající řešení nesymetrických kmitočtových filtrů využívající proudové konvejory typu CCII a DVCC. Tyto struktury vhodně modifikujte a navrhnete vlastní řešení, která budou realizovat diferenční přenosové funkce proudu či napětí. Nalezená řešení podrobte simulacím ve vhodném prostředí. Vytipované obvodové řešení následně realizujte a proveďte experimentální měření.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] JEŘÁBEK, J.; KOTON, J.; ŠOTNER, R.; VRBA, K. Adjustable band-pass filter with current active elements: two fully-differential and single-ended solutions. ANALOG INTEGRATED CIRCUITS AND SIGNAL PROCESSING, 2013, roč. 74, č. 1, s. 129-139. ISSN: 0925-1030.
- [2] CHIU, W.-Y.; HORNG, J.-W. Voltage-Mode Highpass, Bandpass, Lowpass and Notch Biquadratic Filters Using Single DDCC, Radioengineering, Vol. 21., No. 1, 2012, pp. 297-303.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 4.6.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá diferenčními strukturami lineárních obvodů s DVCC a DDCC prvky. Úvod práce se zabývá popisem kmitočtových filtrů. Velký důraz je kladen na proudové aktivní konvejory. Dále se text věnuje problematice diferenčních struktur. Hlavním cílem je transformace nediferenční struktury na strukturu diferenční za pomoci diferenčních proudových konvektorů a porovnání se strukturou nediferenční.

Klíčová slova

Univerzální proudový konvektor, diferenční proudový konvektor, diferenční struktura, kmitočtový filtr, dolní propust, horní propust, pásmová propust, pásmová zádrž

Abstract

This bachelor's thesis deals with the differential structures of the linear circuits with DVCCs and DDCCs elements. The introductory part of the thesis deals with the description of the frequency filters. Significant emphasis is put on the active current conveyors. Furthermore, the text focuses on issue of differential structures. The main aim is the transformation of the nondifferential structure to the differential structure using the differential current conveyors and the comparison with the nondifferential structure.

Keywords

Universal current conveyor, differential current conveyor, differential structure, frequency filter, low pass, high pass, band pass, band stop

SLÁDOK, O. *Diferenční struktury lineárních obvodů s DDCC a DVCC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 65 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D..

Prohlášení

Prohlašuji, že svoji bakalářskou práci na téma: *Diferenční struktury lineárních obvodů s DDCC a DVCC* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení §11 a následujících autorského zákona č.121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení §152 trestního zákona č.140/1961 Sb.

V Brně dne.....

Podpis autora.....

Poděkování

Rád bych poděkoval panu doc. Ing. Jaroslavu Kotonovi, Ph.D. za vedení této bakalářské práce, věcné připomínky, cenné rady a průběžné konzultace při psaní tohoto textu.

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Obsah

ÚVOD.....	10
1. Kmitočtové filtry.....	11
1.1. Stručný přehled o vlastnostech kmitočtových filtrů	12
1.2. Dělení filtrů.....	12
1.3. Selektivní filtry	13
1.3.1. Filtr typu dolní propust.....	14
1.3.2. Filtr typu horní propust	14
1.3.3. Filtr typu pásmová propust.....	14
1.3.4. Filtr typu pásmová zadrž	15
1.3.5. Filtr typu fázovací členek.....	15
1.4. Diferenční filtry.....	16
1.5. Navrhování diferenčních struktur.....	16
1.5.1. Transformace příčných struktur na diferenční	16
1.5.2. Transformace podélných struktur na diferenční	18
1.6. Navrhování plně diferenčních aktivních prvků	19
2. Aktivní proudové prvky.....	20
2.1.1. Obecný proudový konvejer (GCC).....	20
2.1.2. Diferenční proudový konvejer (DVCC)	21
2.1.3. Diferenční rozdílový proudový konvejer (DDCC).....	22
2.1.4. Univerzální proudový konvejer (UCC)	23
3. Filtrační struktury.....	24
3.1. Transformace nesymetrických filtrů na filtry symetrické	25
3.2. Modifikace vnitřní nesymetrické části obvodu	29
4. Transformace nesymetrických filtrů na symetrické	31
4.1. Výchozí nesymetrická struktura	31
4.2. Realizace symetrického zapojení modifikace 1	33
4.3. Realizace symetrického zapojení modifikace 2	36
4.4. Realizace symetrického zapojení modifikace 3	38

4.5. Realizace symetrického zapojení modifikace 4	41
5. Experimentální měření	47
6. Závěr	51
Seznam použitých veličin, symbolů a zkratk	52
Seznam použité literatury	53
Příloha A – Převodník nediferenčního signálu na diferenční a naopak.....	56
Příloha B – Provedení symetrického filtru spolu s převodníky	60
Příloha C – Originální výsledky měření získané z obvodového analyzátoru 4395 A ...	64

ÚVOD

V oblasti elektrotechniky a elektroniky se setkáváme s kmitočtovými filtry velmi často. Touto problematikou kmitočtových filtrů matematickým a obecným popisem se zabývám v první části této práce.

Další kapitola je věnována proudovým konveojům, jmenovitě: obecný proudový konveoj, univerzální proudový konveoj, diferenční proudový konveoj a diferenční rozdílový proudový konveoj. Je zde proveden jejich obecný a matematický popis. V práci se s těmito aktivními prvky často setkáme. Dále jsou popsány jak struktury nesymetrické, tak struktury symetrické, které tyto proudové konveojy využívají. Výhodou symetrických proudových konveojů je, že nám umožní větší rozmanitost při vyvážení diferenčních struktur.

Ve 4. kapitole je popsán nediferenční obvod 2. řádu, který dokáže realizovat všechny standardní filtrační funkce. Z tohoto nesymetrického obvodu vycházejí čtyři navržené diferenční struktury, které byly odsimulovány a následně zpracovány. Poslední z těchto diferenčních struktur byla využita pro experimentální měření.

Poslední 5. kapitola se zabývá praktickým měřením, kde diferenční kmitočtový filtr bylo nutné obměnit v podobě převodníků nediferenčního napětí na diferenční napětí a opačně. Výsledky experimentálního měření byly vyhodnoceny a následně porovnány s průběhy simulací.

1. KMITOČTOVÉ FILTRY

Kmitočtové filtry jsou lineární elektrické obvody [1], obvykle dvojbrany, které se využívají v mnoha oblastech elektrotechniky a elektroniky. Principem filtrů je, že některé kmitočty propustí bez ovlivnění, tato oblast se nazývá propustné pásmo a jiné kmitočty v této oblasti naopak potlačuje, takovému pásmu říkáme pásmo nepropustné.

Můžeme je nalézt v celé řadě obvodů a systémů [2]. Setkáváme se s nimi například v audiotechnice pro kmitočtové výhybky, jako horní nebo dolní propust. Pásmové zádrže se dají použít proti blokování nechtěných frekvencí. V telekomunikacích se filtry používají při přenosu dat, v usměrňovačích k odstranění vyšších harmonických složek.

Obecně můžeme rozlišovat mezi aktivními nebo pasivními obvodovými strukturami. Nejčastěji se kmitočtové filtry realizují pomocí pasivních součástek, nejvyužívanějšími jsou kondenzátory a rezistory. Tyto prvky jsou levnou a dostupnou variantou a jejich výhodou je jednoduchost, bez potřeby externího napájení. Využití pasivních filtrů je však omezené. Používají se, pokud se nekladou vysoké nároky na přesnost aproximace přenosové funkce.

Při použití RLC filtru dosáhneme lepších přenosových parametrů, než u filtru RC. Pomocí filtru RLC lze realizovat jakýkoli druh filtru. Nevýhoda je v použití induktorů, při nízkých kmitočtech je potřeba použít dražších a větších induktorů a tím se nám zvedne cena celého zařízení a velikost. Můžeme realizovat kmitočtové filtry s mezním kmitočtem až stovky MHz [1].

V dnešní době je, ale snahou pasivní filtry nahradit filtry aktivními, (nejčastěji jsou to napěťové nebo proudové konvejory, operační zesilovače, OTA zesilovače) z důvodu snazší přeladitelnosti nebo nastavitelnosti. Základ aktivního filtru je tvořen aktivním prvkem, který je doplněn pasivními součástkami. Nevýhodou aktivních filtrů je, že potřebují externí napájení, ale dnešní technologie požadavky na napájení minimalizuje.

1.1. STRUČNÝ PŘEHLED O VLASTNOSTECH KMITOČTOVÝCH FILTRŮ

Když si kmitočtový filtr představíme jako lineární dvojbran podle [1], který můžeme vidět na Obr. 1.1, tak můžeme jeho chování vyjádřit a popsat pomocí těchto přenosových vztahů:

$$K_u = \frac{U_2}{U_1}, I_2 = 0, \quad (1.1)$$

$$K_I = \frac{I_2}{I_1}, U_2 = 0. \quad (1.2)$$



Obr. 1.1: Lineární dvojbran

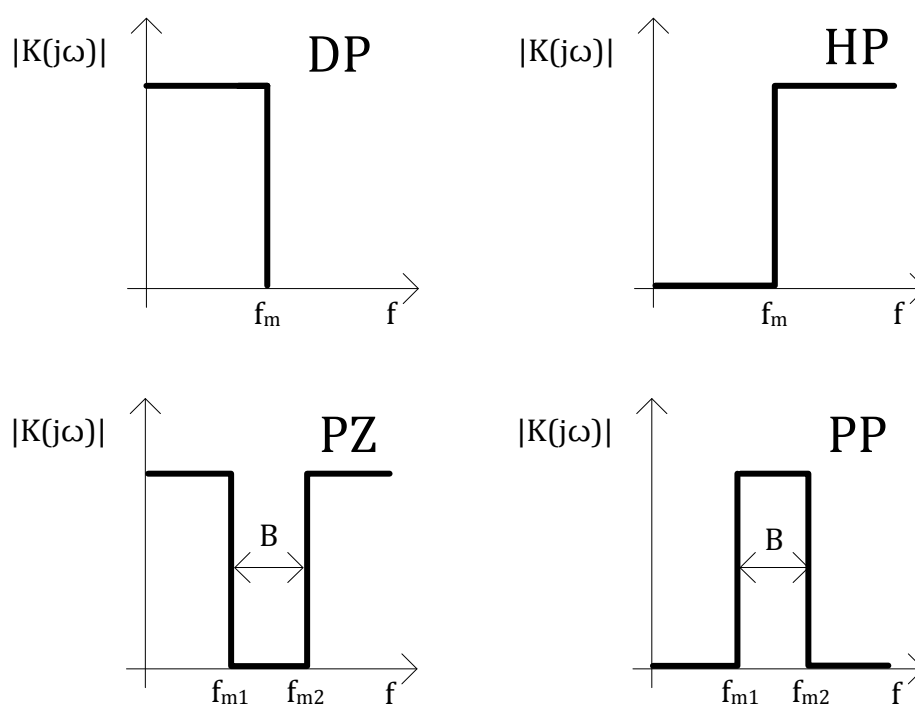
Uvedené rovnice (1.1) a (1.2) přenosu napětí a proudu obecně platí jak pro obvody lineární, tak pro obvody nelineární. Ale podstatné u lineárních obvodů je skutečnost, že vstupuje-li do dvojbranu napětí s kmitočtem f , pak na výstupu je signál opět s kmitočtem f , kde další spektrální složky výstupní signál neobsahuje. Jediné, co se mění je závislost propustného či nepropustného pásma filtru a kmitočtu f při změně amplitudy a fáze.

1.2. DĚLENÍ FILTRŮ

Jednotlivé filtry můžeme dělit z hlediska zpracování signálu na diferenční a nediferenční filtry nebo podle toho, jaké mají vlastnosti jejich elektronické součástky, ze kterých jsou sestaveny, buď na filtry aktivní nebo na filtry pasivní. A dále podle zpracování signálů, z hlediska jejich propustnosti na selektivní filtry.

1.3. SELEKTIVNÍ FILTRY

Jednotlivé filtry pasivní nebo aktivní dělíme na dolní propust (DP), horní propust (HP), pásmová propust (PP), pásmová zadrž (PZ), fázovací člunek (FČ) a to podle toho jakým způsobem propouští signál. Každý z jednotlivých filtrů má f_m mezní kmitočet, který je specifický pro každý filtr, od tohoto kmitočtu filtr začíná potlačovat signál, propouštět signál, nebo vybírat. Na Obr. 1.2 vidíme ideální charakteristiku podle [4] jednotlivých kmitočtových filtrů.



Obr. 1.2: Ideální charakteristiky kmitočtových filtrů DP, HP, PZ, PP

1.3.1. FILTR TYPU DOLNÍ PROPUST

Filtr dolní propust (DP) je filtr, anglicky Low-Pass filter (LP), který propouští signály [1], [2], které jsou nižší než mezní kmitočet f_0 , kdy modulová charakteristika signálu poklesne o 3dB a vyšší signály potlačuje.

Filtry dolní propusti se používají v usměrňovačích, kde je potřeba oddělit stejnosměrnou složku a potlačit střídavé složky, dále také v audiotechnice a jako antialiasingový filtr.

Přenosová funkce pro filtr DP 2. řádu [3]:

$$K(p) = \frac{\omega_0^2}{p^2 + p \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}, \quad (1.3)$$

kde symbol $\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0$ a f_0 představuje mezní kmitočet. $K(p)$ je přenos napětí, p je komplexní kmitočet a rovná se $j\omega$. Q je činitel jakosti.

1.3.2. FILTR TYPU HORNÍ PROPUST

Filtr horní propust (HP) je filtr, anglicky High-Pass filter (HP), který propouští vysoké kmitočty [1] [2], větší než je mezní kmitočet f_0 a naopak nízké kmitočty potlačuje. Stejně jako u filtru dolní propusti určuje řád filtru strmost, podle toho jak se mění přenosová funkce filtru na hranici propustnosti a nepropustnosti. Jeho využití opět najdeme v audiotechnice, v měřící elektronice.

Přenosová funkce pro filtr HP 2. řádu [3]:

$$K(p) = \frac{p^2}{p^2 + p \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (1.4)$$

1.3.3. FILTR TYPU PÁSMOVÁ PROPUST

Filtru typu pásmová propust (PP) je filtr, anglicky Band-Pass filter (BP), který na rozdíl od horní a dolní propusti, které mají mezní kmitočet (tj. pokles přenosu o 3dB), kde až po tuto frekvenci filtr propouští všechny nižší kmitočty (dolní propust) a všechny vyšší kmitočty (horní propust), propouští pouze pásmo určené dvěma

mezními frekvencemi, ostatní kmitočty potlačuje [1]. Využívá se například v generátorech sinusového napětí.

Přenosová funkce pro filtr PP 2. řadu [3]:

$$K(p) = \frac{p^2 + \omega_0^2}{p^2 + p \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (1.5)$$

1.3.4. FILTR TYPU PÁSMOVÁ ZÁDRŽ

Filtr typu pásmová zádrž (PZ) je filtr, anglicky Band-Reject filter (BR), který nepropouští signál [1], jehož kmitočet je mezi horním a dolním mezním kmitočtem. Existují aktivní a pasivní zapojení. Pasivní je složeno z rezistorů a kondenzátorů, ale jeho nevýhodou je, že jeho přenos je ztrátový. Aktivní zapojení má v obvodě ještě zahrnut operační zesilovač, který zajišťuje přenos kladných hodnot a už tedy není ztrátový. Jeho využití zase najdeme v audiotechnice proti nechtěné zpětné vazbě, také je možné ho využít i na jiné blokování nechtěných frekvencí.

Přenosová funkce pro filtr PZ 2. řádu [3]:

$$K(p) = \frac{p \frac{\omega_0}{Q}}{p^2 + p \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (1.6)$$

1.3.5. FILTR TYPU FÁZOVACÍ ČLÁNEK

Filtr typu fázovací článek (FZ) je filtr, anglicky All-Pass filter (AP), který zpracovává signál, kde bude v tomto pásmu frekvencí všude stejný zisk, ale mění fázový vztah mezi různými frekvencemi, je to tím, že mění jeho fázový posuv. Obecně platí, že filtr je popsán frekvencí, při které fázový posuv překračuje 90°. Využívá se obvykle pro kompenzaci jiných nežádoucích fázových posuvů, které vznikají v systému.

Přenosová funkce pro filtr (FZ) 2. řádu [3]:

$$K(p) = \frac{p^2 - p \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2}{p^2 + p \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} \quad (1.7)$$

1.4. DIFERENČNÍ FILTRY

Vzhledem k vývoji aktivních prvků s diferenčními vstupy a výstupy se diferenční kmitočtové filtry využívají např. v oblasti elektrotechniky. Diferenční struktury nabízejí více výhod než struktury nediferenční. Zvyšují dynamický rozsah a procento potlačení soufázového signálu, omezují efekty výkonového zesílení [6] a odstraňují harmonické zkreslení signálu.

Nevýhodou diferenčních kmitočtových filtrů spočívá v tom, že ke své realizaci potřebují dvojnásobek aktivních a pasivních prvků, oproti nediferenční struktuře, tím se stává výsledný obvod složitější, což se odrazí na spotřebě elektrické energie.

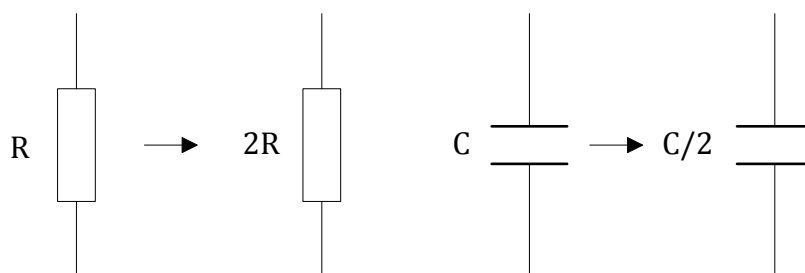
S diferenčními filtry se můžeme setkat v telefonních nebo mobilních zařízeních. Svoji funkci zastávají při filtrování signálu na symetrickém vedení, kde oddělují datový signál od telefonního.

1.5. NAVRHOVÁNÍ DIFERENČNÍCH STRUKTUR

Nejpoužívanějším způsobem navrhování struktur je transformace navržené nediferenční struktury na diferenční. Výslednou diferenční strukturu získáme zrcadlením nediferenční struktury vůči zemi, tím se nám zvýší počet pasivních prvků skoro na dvojnásobek. Za aktivní prvky, které nemají diferenční výstupy a vstupy, použijeme diferenční prvky. Při této metodě je nutné určit hodnoty pasivních zrcadlených prvků. Určujeme podle toho, kterou transformaci si zvolíme, jedná se o transformaci příčných nebo podélných struktur. Nebo také můžeme navrhovat přímo cíleně.

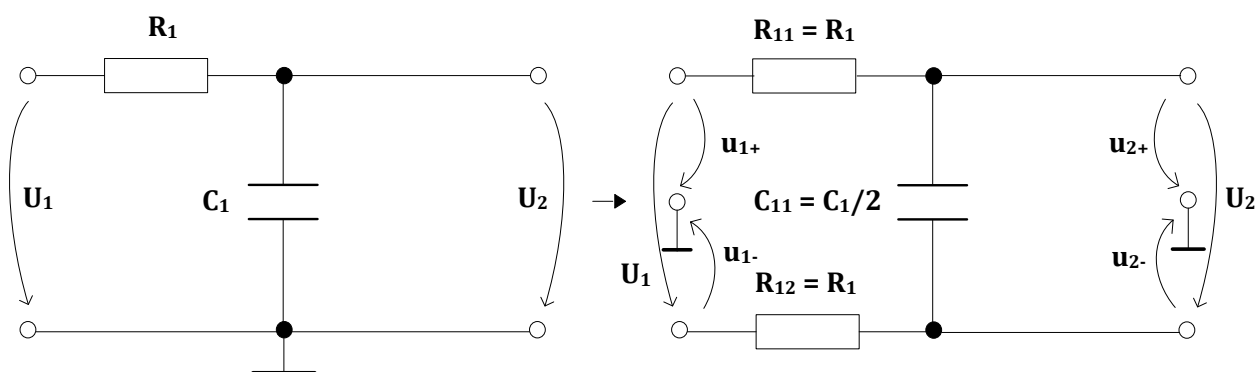
1.5.1. TRANSFORMACE PŘÍČNÝCH STRUKTUR NA DIFERENČNÍ

Přeměnu pasivních příčných struktur na diferenční realizujeme tak, že zrcadlíme nediferenční strukturu vůči zemi podle [7] a jak už z názvu vyplývá, změníme pouze parametry prvků, které leží v příčné větvi. U podélných prvků se nám parametry ani poloha nezmění. Každý kapacitor, který leží v příčné větvi, má o polovinu sníženou hodnotu oproti původní hodnotě a hodnota rezistorů se zvýší na dvojnásobnou oproti hodnotě původní. Pravidla určování hodnot vidíme na Obr. 1.3.



Obr. 1.3: Pravidla transformace příčných rezistorů a kapacitorů na diferenční strukturu

Na Obr. 1.4 vidíme příklad jednoduché nediferenční struktury, kterou převedeme na diferenční pomocí pravidel příčné transformace.



Obr. 1.4: Příklad příčné transformace na diferenční strukturu

Předcházející schéma, které popisuje ukázkou příčné transformace, jak lze dostat z nediferenční struktury zapojení diferenční, vidíme na Obr. 1.4, a můžeme jej popsat následujícími rovnicemi.

Pro nediferenční strukturu (vlevo) platí přenosová funkce:

$$K_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad (1.8)$$

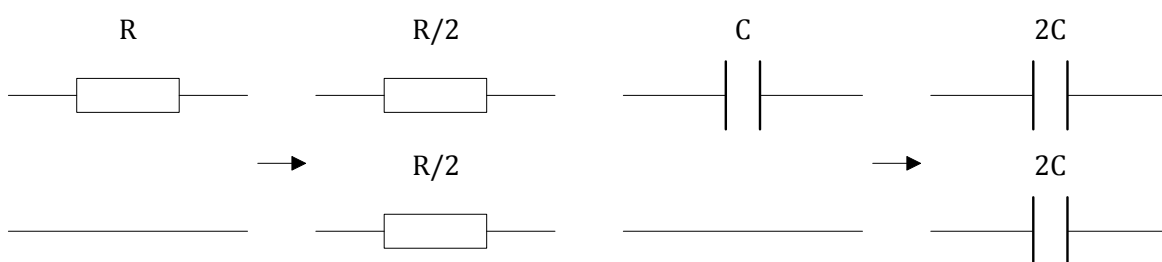
Pro diferenční strukturu (vpravo) platí přenosová funkce:

$$K_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{u_{2+} - u_{2-}}{u_{1+} - u_{1-}}. \quad (1.9)$$

1.5.2. TRANSFORMACE PODÉLNÝCH STRUKTUR NA DIFERENČNÍ

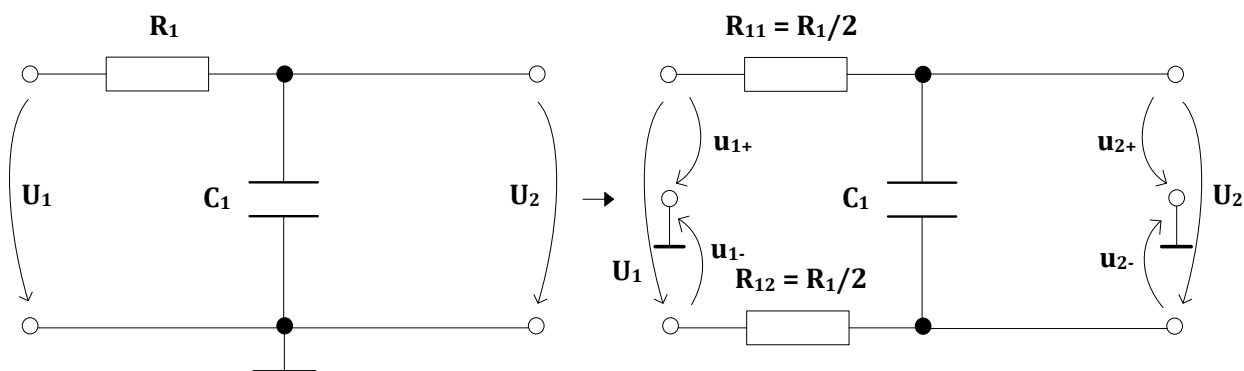
Při transformování pasivních podélných struktur na diferenční zrcadlíme nediferenční strukturu vůči zemi podle [7] a jak už z názvu vyplývá, měníme pouze parametry prvků, které leží v podélné větvi. Parametry prvků v příčných větvích se nemění.

Každý kapacitor, který leží v podélné větvi, má dvojnásobnou hodnotu oproti původní hodnotě a transformuje se na dva kapacitory, hodnota rezistorů se sníží na polovinu oproti hodnotě původní a také se transformují na dva. Pravidla určování hodnot vidíme na Obr. 1.5.



Obr. 1.5: Pravidla transformace podélných rezistorů a kapacitorů na diferenční strukturu

Na Obr. 1.6 vidíme příklad jednoduché nediferenční struktury, kterou převedeme na diferenční pomocí pravidel podélné transformace.



Obr. 1.6: Příklad podélné transformace na diferenční strukturu

Předcházející schéma, které popisuje podélnou transformaci z nediferenční struktury na diferenční vidíme na Obr. 1.6, a můžeme jej popsat následujícími rovnicemi.

Pro nediferenční strukturu (vlevo) platí přenosová funkce:

$$K_u = \frac{U_2}{U_1}, \quad (1.10)$$

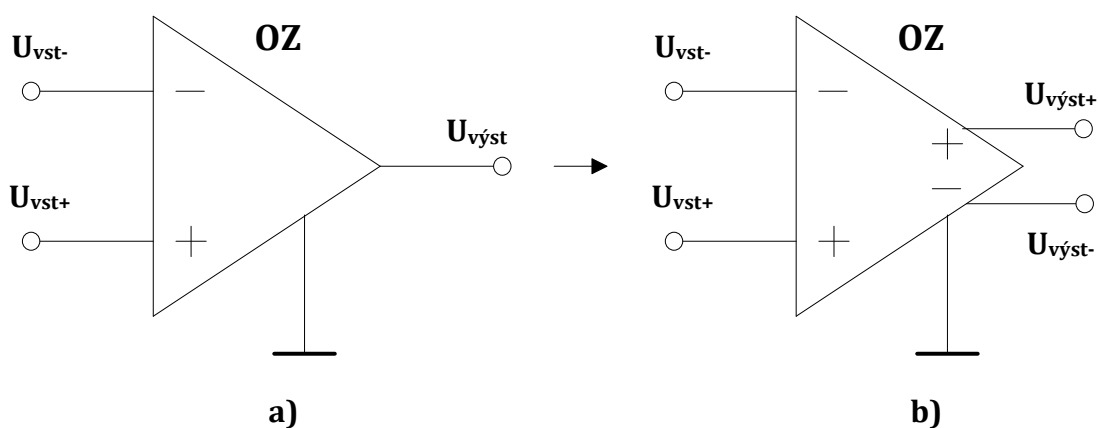
Pro diferenční strukturu (vpravo) platí přenosová funkce:

$$K_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{u_{2+} - u_{2-}}{u_{1+} - u_{1-}}. \quad (1.11)$$

1.6. NAVRHOVÁNÍ PLNĚ DIFERENČNÍCH AKTIVNÍCH PRVKŮ

Obecně mají diferenční aktivní prvky dva vstupy a dva výstupy, které mají opačnou polaritu a mohou tedy vytvořit dvě zpětné vazby. Výsledný signál dostaneme po odečtení dvou vstupních signálů neboli výstupních signálů. Kdybychom vytvářeli diferenční prvek z nediferenčního, musíme daný nediferenční prvek rozšířit o vstup nebo výstup tak, aby mohl zpracovat rozdílový signál.

Na Obr. 1.7 vidíme operační zesilovač, který má diferenční vstup a nediferenční výstup. Proto přidáme ještě jeden výstup, a ten bude na rozdíl od původního výstupu invertovaný.



Obr. 1.7: a) Klasické OZ, b) Diferenční typ OZ

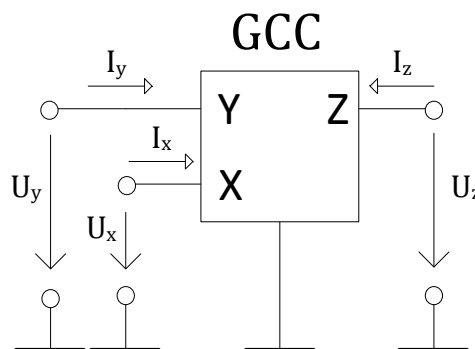
2. AKTIVNÍ PROUDOVÉ PRVKY

Aktivní filtry podle [2] umožňují realizovat v oblastech nízkých kmitočtů (řádově až do jednotek MHz) bez použití induktorů velmi kvalitní filtry. Pomocí kapacitorů a rezistorů můžeme však dosáhnout určitých typů filtrů, s kterými však nedocílíme vysoké jakosti filtru. Použití induktorů pro vysoké kmitočty není problém, ale při nízkých kmitočtech je potřeba induktory s velkou indukčností. Pro takovou potřebu jsou induktory velice rozměrné a špatně se realizují. Proto v oblasti nízkých kmitočtů se bez nich obejdeme, použijeme-li filtry RC spolu s aktivními prvky, např. s operačními zesilovači. Takové filtry se nazývají aktivní filtry RC.

Pokud se posuneme do pracovní oblasti vysokých kmitočtů, tak v současné době se velká pozornost věnuje filtrům s novými aktivními prvky, jako jsou napěťové a proudové konvejory (CCx, ICCx, UCC, UVC, DCVC, DVCC, DDCC, atd.), nebo transimpedanční zesilovače (OTA, BOTA). Pomocí těchto prvků je umožněno pracovat na velmi vysokých kmitočtech řádově až stovky MHz.

2.1.1. OBECNÝ PROUDOVÝ KONVEJER (GCC)

Proudový konvejer je obecně trojbran podle [8] [9]. Proud I_x je nezávislou proměnnou veličinou, která se přenáší na výstupní bránu, někdy i na napěťovou bránu. Schematickou značku vidíme na Obr. 2.1. Na schematické značce vidíme tři brány. Každá brána má jiné vlastnosti a funkce. Obecný proudový konvejer má dvě vstupní a jednu výstupní bránu. Proudovou bránu označíme X, napěťovou Y a výstupní Z. Soustava uzlových proudů (I_x, I_y, I_z) teče dovnitř bloku. Soustavu napětí (U_x, U_y, U_z) z jednotlivých bran orientujeme souhlasně do jednoho uzlu.



Obr. 2.1: Schematická značka obecného proudového konvejeoru GCC

Pro obecný proudový konvektor platí matice, která vyjadřuje vztahy mezi veličinami na jednotlivých branách:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_y \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & a & 0 \\ b & 0 & 0 \\ c & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

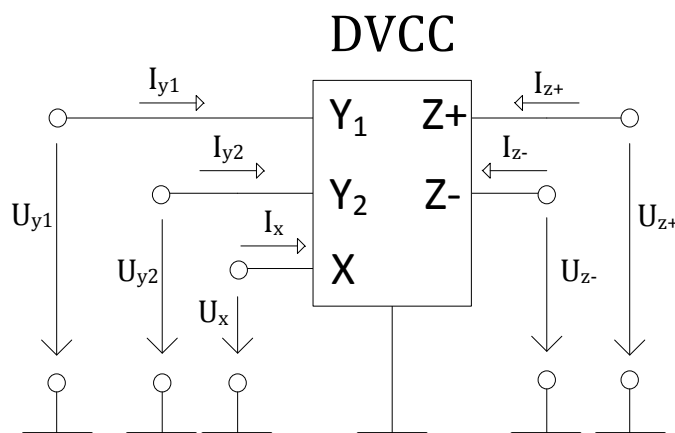
Pomocí obecného proudového konvektoru (GCC) můžeme zrealizovat až 12 trojbranných proudových konvektorů [2]. Přehled proudových konvektorů můžeme vidět v Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Přehled proudových konvektorů, které můžeme zrealizovat pomocí GCC

	I. generace				II. generace				III. generace			
	CCI+	CCI-	ICCI+	ICCI-	CCH+	CCH-	ICCH+	ICCH-	CCII+	CCII-	ICCIH+	ICCIH-
a	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1
b	1	1	1	1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1
c	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	-1

2.1.2. DIFERENČNÍ PROUDOVÝ KONVEJOR (DVCC)

Tento diferenční proudový konvektor DVCC (differential voltage current conveyor) je definován jako pětibran s rozdílovým napětovým vstupem podle [8], [10], [11]. Obsahuje dvě brány Y_1 a Y_2 , kde na bránu X převádí rozdílové napětí mezi branami Y_1 a Y_2 . Schematickou značku můžeme vidět na Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Schematická značka diferenčního proudového konvektoru DVCC

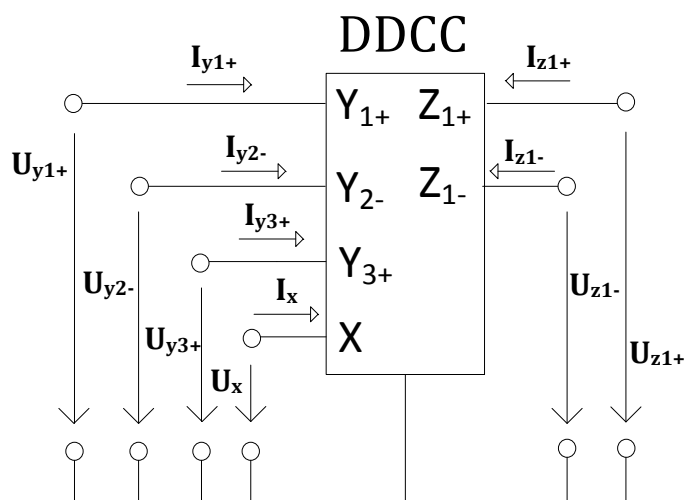
Vztahy mezi svorkami diferenčního proudového konveju jsou určeny následující maticí:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_{Y1} \\ I_{Y2} \\ I_{Z1} \\ I_{Z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_x \\ U_{Y1} \\ U_{Y2} \\ U_{Z1} \\ U_{Z2} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Všechny druhy konveju druhé generace CCII, jak negativní, pozitivní, invertující, neinvertující a jejich kombinace můžeme realizovat pomocí tohoto obvodu. Správným uzemněním můžeme např. dostat CCII+ uzemníme-li Y- a Z.

2.1.3. DIFERENČNÍ ROZDÍLOVÝ PROUDOVÝ KONVEJOR (DDCC)

Tento diferenční rozdílový proudový konveju DDCC (differential difference current conveyor) je definován jako šestibran [12], [13]. DDCC obsahuje tři vstupní svorky napětí s vysokou vstupní impedancí Y_1 , Y_2 , Y_3 . Dále obsahuje vstup napětí X , který má nízkou vstupní impedanci. Schematickou značku můžeme vidět na Obr. 2.3.



Obr. 2.3: Schematická značka diferenčního rozdílového proudového konveju DDCC

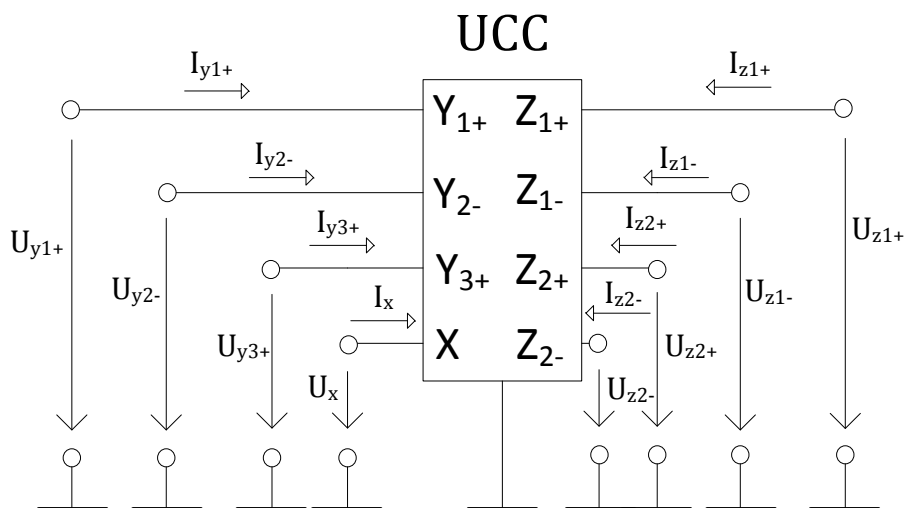
Vztahy mezi svorkami diferenčního rozdílového proudového konveju jsou určeny následující maticí:

$$\begin{bmatrix} U_x \\ I_{Y1} \\ I_{Y2} \\ I_{Y3} \\ I_{Z1} \\ I_{Z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_x \\ U_{Y1} \\ U_{Y2} \\ U_{Y3} \\ U_{Z1} \\ U_{Z2} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

2.1.4. UNIVERZÁLNÍ PROUDOVÝ KONVEJOR (UCC)

Kvůli velkému množství proudových konvektorů byl navrhnutý konvektor, díky kterému bylo možné realizovat všechny existující konvektory. Nazývá se univerzální proudový konvektor UCC (Universal Current Conveyor), který je definován jako osmibran [9], [16]. Tři vysoko impedanční napěťové vstupy (Y_1, Y_2, Y_3) a jeden nízko impedanční vstup (X) a čtyři proudové výstupy ($Z_{1+}, Z_{1-}, Z_{2+}, Z_{2-}$). Napěťové vstupy (Y_1 a Y_2) jsou rozdílové vstupy a (Y_1 a Y_3) jsou součtové vstupy. Výstupy Z_{1+} a Z_{2+} jsou inverzní proti výstupům Z_{1-} a Z_{2-} .

Všechny existující proudové konvektory se mohou realizovat pomocí UCC, vhodným propojením jednotlivých svorek ostatní uzemníme. Pomocí UCC můžeme realizovat jednotlivé typy proudových konvektorů s diferenčním vysoko impedančním vstupem DVCC a DDCC. Schematickou značku můžeme vidět na Obr. 2.4.



Obr. 2.4: Schematická značka univerzálního proudového konvektoru UCC

Vztahy mezi svorkami univerzálního proudového konvektoru jsou popsány následně podle [2]:

$$I_{Z1+} = I_{Z2+} = I_x, \quad (2.4)$$

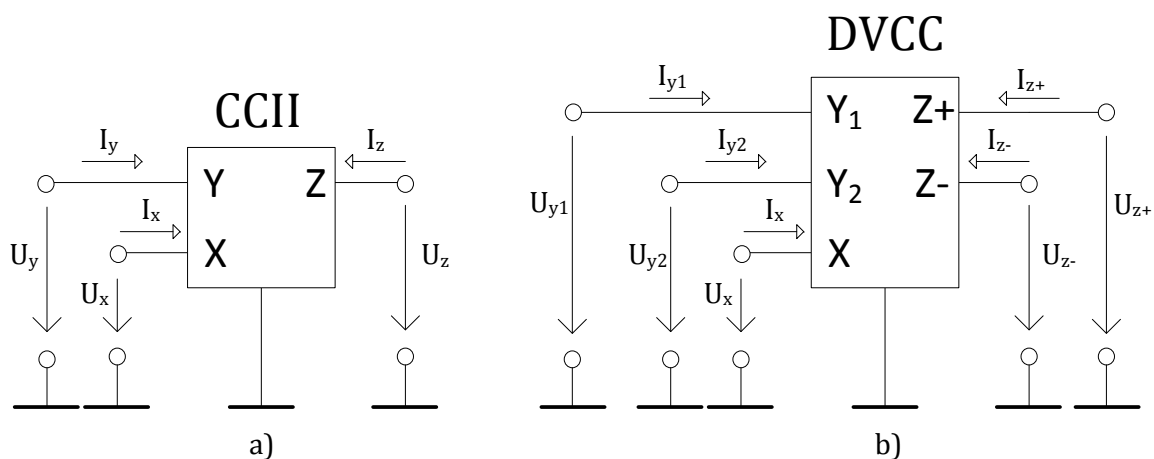
$$I_{Z1-} = I_{Z2-} = -I_x, \quad (2.5)$$

$$I_{Y1+} = I_{Y2-} = I_{Y3+} = 0, \quad (2.6)$$

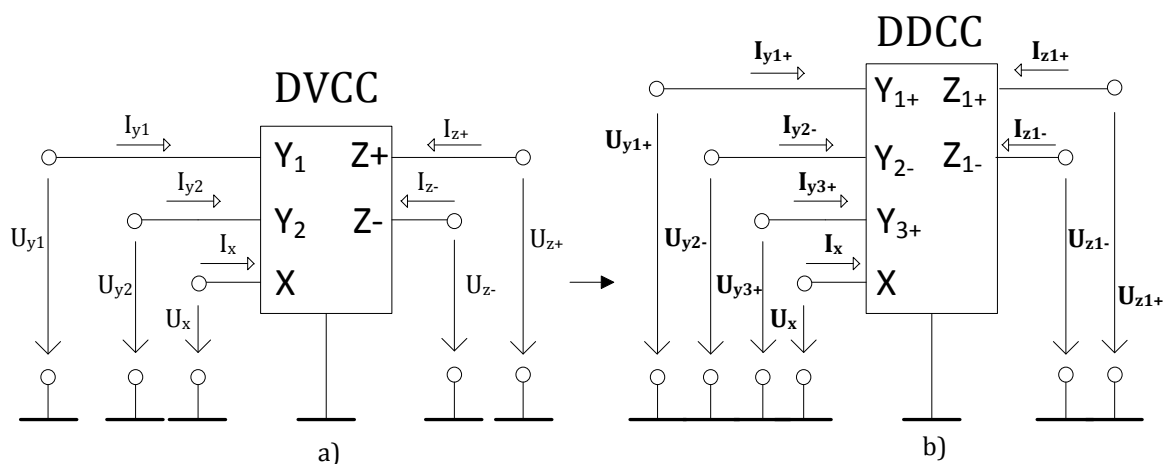
$$U_x = U_{Y1+} - U_{Y2-} + U_{Y3+} \quad (2.7)$$

3. FILTRAČNÍ STRUKTURY

V mé práci budu používat pro vytvoření filtračních struktur diferenční prvek DVCC (differential voltage current conveyor), který vychází z proudového konveje druhé generace CCII, ale oproti tomuto konveji obsahuje dvě brány Y_1 a Y_2 . Na bránu X převádí rozdílové napětí mezi branami Y_1 a Y_2 . Podobné je to i s výstupem, kde diferenční proudový konvektor DVCC obsahuje také dvě brány $Z+$ a $Z-$. V navrhovaném obvodu budu používat tento diferenční aktivní prvek DVCC. Východisko z konveje druhé generace na diferenční proudový konvektor DVCC vidíme na Obr. 3.1. Dále budu používat diferenční rozdílový proudový konvektor DDCC (differential difference current conveyor), který vychází z diferenčního proudového konveje DVCC. Tento postup můžeme vidět na Obr. 3.2. Oproti diferenčnímu proudovému konveji DVCC má diferenční aktivní prvek DDCC, tu výhodu, že nám umožňuje větší variabilitu při použití vnitřních koeficientů proudového konveje, o čem se zmiňuji v následující podkapitole.



Obr. 3.1: a) Konvektor druhé generace CCII, b) diferenční proudový konvektor DVCC



Obr. 3.2: a) Diferenční proudový konvektor DVCC, b) diferenční rozdílový proudový konvektor DDCC

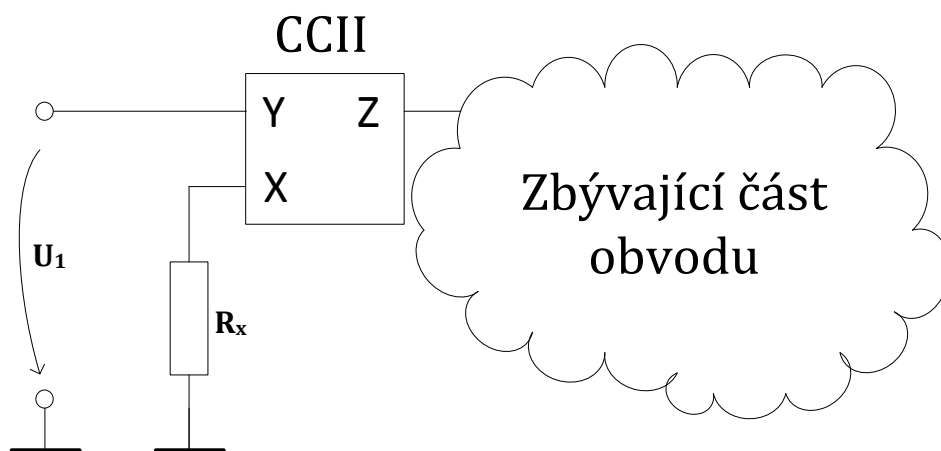
3.1. TRANSFORMACE NESYMETRICKÝCH FILTRŮ NA FILTRY SYMETRICKÉ

Transformace nediferenční struktury na diferenční u pasivních prvků a jednotlivé kroky byly popsány v kapitole 1.4 diferenční filtry viz. Obr. 1.4 a Obr. 1.6, kde jsou u těchto obrázků také uvedeny přenosové funkce jak pro nesymetrické, tak i pro symetrické zapojení.

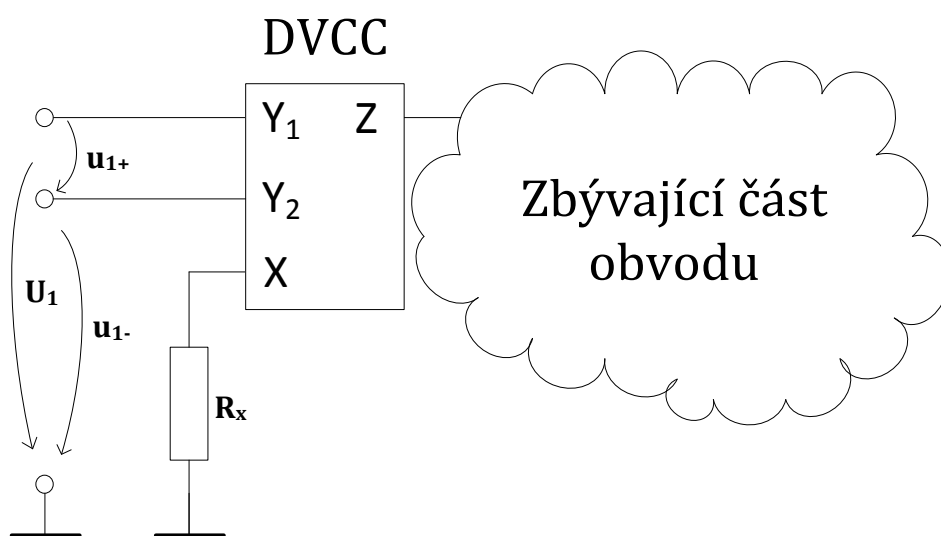
Pokud se bude jednat o transformaci u aktivních prvků, tak je také lze převést do plně diferenční podoby, jak je tomu např. na Obr. 1.7 nebo v [14, 15]. To však vede k vyšší komplexnosti aktivního prvku z pohledu CMOS implementace.

V této práci se využívají stávající a známé typy aktivních prvků, kdy výchozí nesymetrické struktury jsou vhodně modifikovány jak na vstupu, tak i na výstupu. Takto jsou realizovány struktury symetrické, ovšem jen z pohledu vstupní a výstupní brány konečného zapojení, nikoliv z pohledu vnitřní implementace.

Způsob transformace nesymetrického vstupu na symetrický je naznačen na Obr. 3.3 a Obr. 3.4. Jako výchozí nesymetrické struktury jsou vhodné takové, kde vstupní signál je přiváděn přímo na napěťovou bránu Y aktivního prvku. Jak je to uvedeno na Obr. 3.3, jako příklad je uvažován proudový konvektor druhé generace CCII, který je pro názornost vyčleněn z celkového zapojení. K docílení symetrického vstupu lze s výhodou využít aktivního prvku DVCC, jak je to naznačeno na Obr. 3.4. Vstupní diferenční signál je tak přiváděn přímo na napěťové brány Y_1 a Y_2 aktivního prvku, kdy jeho chováním dochází k odstranění souhlasného signálu (nežádoucího rušení) a dále je tak obvodem zpracováván pouze rozdíl užitečného signálu.



Obr. 3.3: Nesymetrická struktura s využitím proudového konvektoru CCII

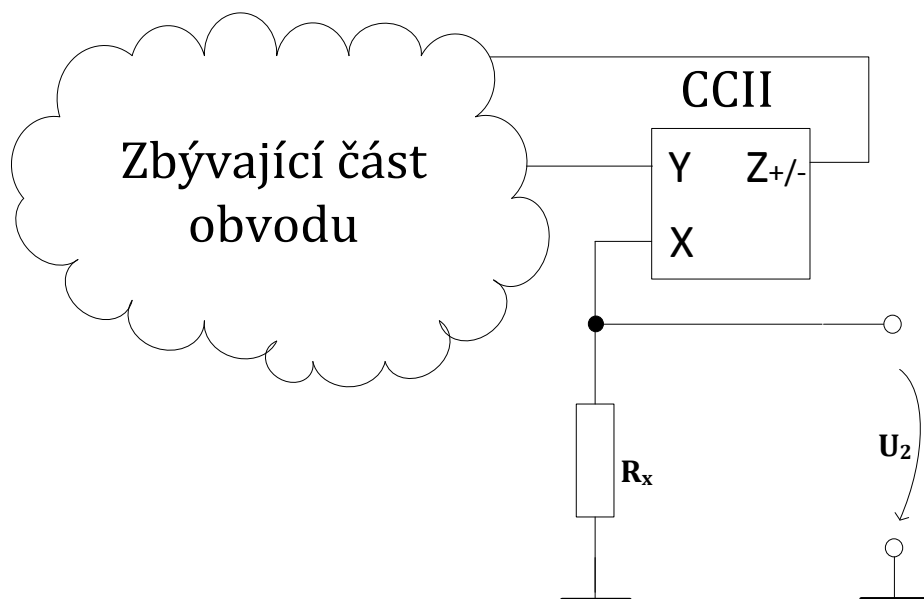


Obr. 3.4: Symetrická struktura s využitím diferenčního proudového konvektoru DVCC

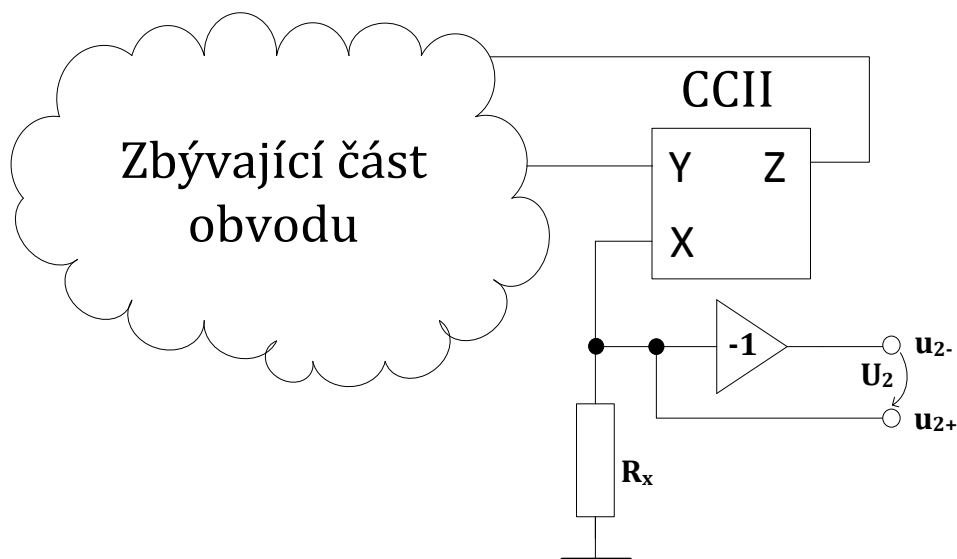
V rámci transformace nesymetrického vstupu na symetrický je tak nahrazen pouze jeden aktivní prvek, přičemž zbývající část obvodu zůstává nezměněna.

Na základě principu transformace nesymetrického napětí na výstupní, která byla uvedena v kap. 1.4, popisující transformace pasivních struktur vyplývá, že je nutné vytvořit rozdíl odpovídajících si napětí, kdy jedno je fázově posunuto o 180° vůči druhému.

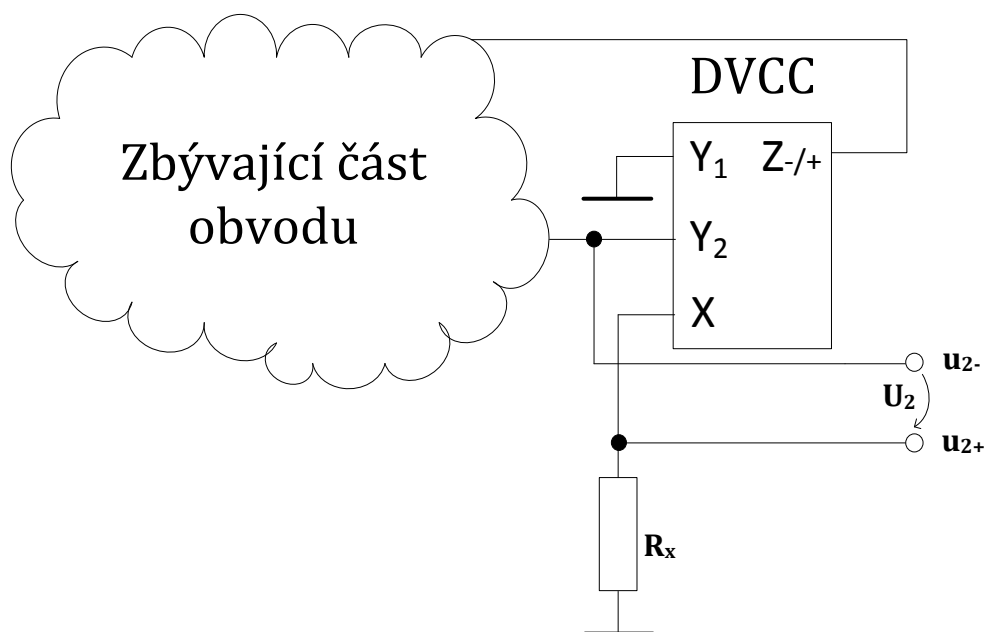
V případě struktur pracujících v napěťovém módu, nejjednodušší způsob realizace symetrického výstupu spočívá v doplnění struktury o napěťový invertor, jak je to naznačeno na Obr. 3.6. Výchozí strukturou je přitom zapojení z Obr. 3.5, kde ze zapojení kmitočtového filtru je vyčleněn jeden proudový konvektor a naznačeno nesymetrické napětí U_2 . Tento princip lze obecně využít u libovolné napěťové odezvy.



Obr. 3.5: Nesymetrická struktura s využitím proudového konvejeoru CCII



Obr. 3.6: Symetrická struktura doplněná o napěťový invertor



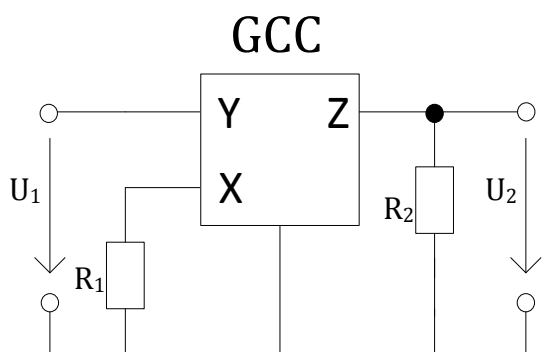
Obr. 3.7: Symetrická struktura s využitím diferenčního proudového konveje DVCC a jeho vnitřního napěťového invertoru

V případě, že napěťová odezva je snímána v uzlu, kde je připojena brána X aktivního prvku (viz Obr. 3.5), lze přistoupit k efektivnějšímu řešení, spočívající v nahrazení původního aktivního prvku CCII diferenčním napěťovým proudovým konvejerem DVCC, jak je zobrazeno na Obr. 3.7. V tomto případě se s výhodou využívá napěťový invertor, který je implementován uvnitř tohoto aktivního prvku a ve srovnání se zapojením z Obr. 3.6 zjednodušuje výslednou realizaci.

Při realizaci symetrického výstupu není nutně nezbytné využívat či vyhledávat napěťový invertor ve struktuře kmitočtového filtru (Obr. 3.6, Obr. 3.7). Jak bylo uvedeno v [23], symetrickou napěťovou odezvu je možné získat i snímáním dvou různých napěťových odezev a vytvořením jejich difference. I tohoto principu je v této práci využito, konkrétně při realizaci symetrické pásmové zádrže (viz kap. 4.5), která byla později i experimentálně ověřena.

3.2. MODIFIKACE VNITŘNÍ NESYMETRICKÉ ČÁSTI OBVODU

Osvětlení problému modifikace vnitřní nesymetrické části obvodu u proudových konvektorů si ukážeme na jednoduchém příkladu, který můžeme vidět na Obr. 3.8. Na tomto obrázku můžeme vidět obecný proudový konvektor GCC a k němu připojené dva odpory (R_1 a R_2), které jsou uzemněné. Přenos mezi vstupem Y a X si označíme písmenem a . Přenos ze vstupu X na výstup Z si označíme písmenem c .



Obr. 3.8: Příklad k osvětlení problému modifikace vnitřní nesymetrické části

Obecně můžeme říci, že pro obecný proudový konvektor GCC, který vidíme na Obr. 3.8, platí následující vztahy:

$$I = a \cdot \frac{U_1}{R_1}, \quad U_2 = -c \cdot I \cdot R_2, \quad (3.1)$$

$$\frac{U_2}{U_1} = -a \cdot c \cdot \frac{R_2}{R_1} \quad (3.2)$$

Jak je vidět z rovnice (3.2), volbou koeficientů a a c je možné definovat, zda se výsledné zapojení bude chovat podobně jako invertující zesilovač a výsledné zesílení tedy bude:

$$\frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1}, \quad (3.3)$$

kdy pro součin koeficientů musí platit $a \cdot c = 1$, nebo bude mít neinvertující charakter, tj.:

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1}, \quad (3.4)$$

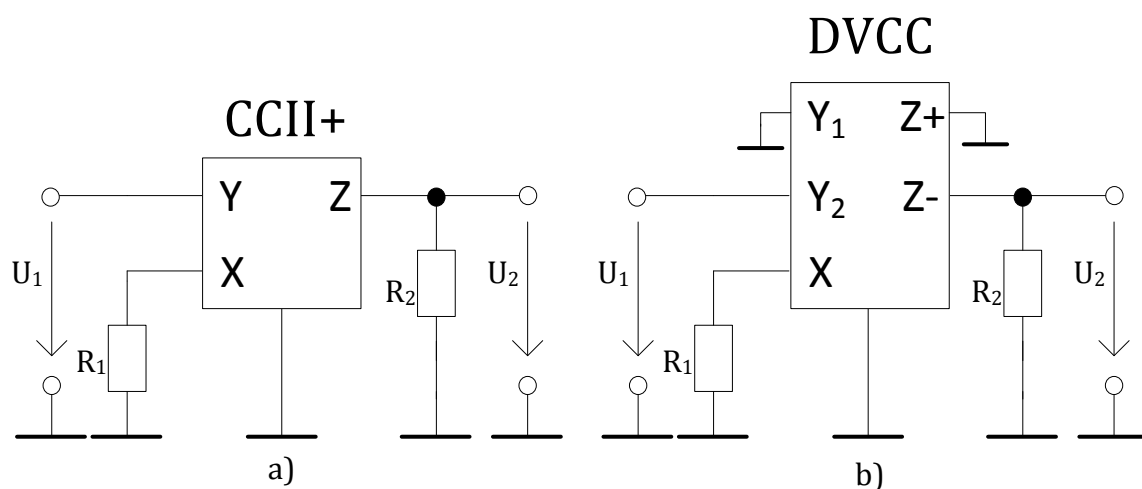
kdy $a \cdot c = -1$.

Je-li požadováno, aby výchozí zapojení z Obr. 3.8 se tedy chovalo jako invertující zesilovač dle (3.3), pak variantní volbou jednotlivých koeficientů je možné

popsat několik výsledných řešení. V Tab. 3.1 je uveden přehled variantních kombinací koeficientů a a c , které splňují podmínku $a \cdot c = 1$. Samotná realizace jednotlivých variantních řešení je uvedena na Obr. 3.9.

Tab. 3.1: Přehled hodnot koeficientů a a c

	Varianta A	Varianta B
a	1	-1
c	1	-1



Obr. 3.9: Řešení výchozí struktury z Obr. 3.8: a) varianta A, b) varianta B

Na základě výše uvedeného teoretického popisu vyplývá, že modifikace vnitřní nesymetrické části obvodu spočívá ve vhodné záměně bran aktivního prvku tak, aby nedošlo k nežádoucí změně charakteristické rovnice. Nutné modifikace lze jednoduše popsat těmito následujícími kroky:

- Pokud u pozitivního proudového konveju druhé generace CCII+, přichází vstup do brány Y a u diferenčního proudového konveju DVCC jde vstup do brány Y₂, potom všechny výstupy Z +/- musíme zaměnit za výstupy Z-/+, jak je již naznačeno na Obr. 3.9 a) a Obr. 3.9 b).
- Když změníme polaritu napěťové brány Y u aktivního prvku, k jeho záměně diferenční podobou nedochází, nemění se ani polarita výstupu proudových bran.

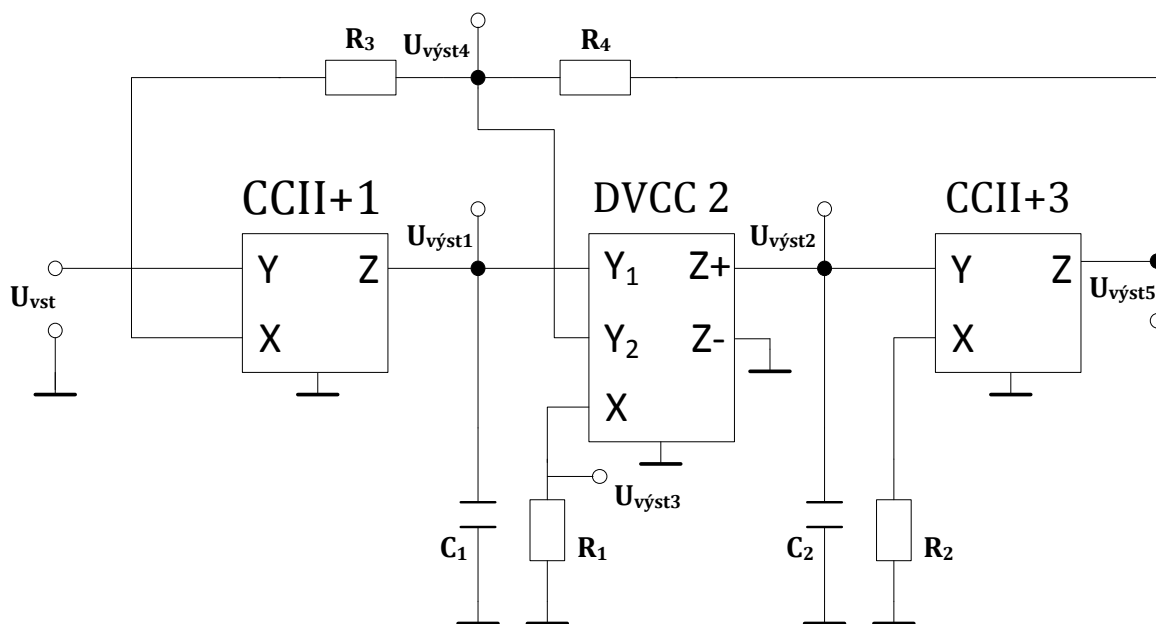
Ukázku tohoto principu a následnému osvětlení problému modifikace vnitřní nesymetrické struktury u proudových konveju jsem využíval ve své práci při navrhovaném obvodu.

4. TRANSFORMACE NESYMETRICKÝCH FILTRŮ NA SYMETRICKÉ

Princip a jednotlivé kroky transformace nesymetrických struktur na symetrické, které byly popsány v předešlé části práce jsou nyní ukázány na konkrétním příkladu.

4.1. VÝCHOZÍ NESYMETRICKÁ STRUKTURA

Pro tuto práci jsem si vybral univerzální filtr 2. řádu s jedním vysoko impedančním vstupem a pěti výstupy vycházející z [10], na kterém bych chtěl aplikovat své zaměření této práce, při použití teorie, kterou jsem popisoval výše. V tomto navrhovaném obvodu jsou, použity tři aktivní prvky, kterými jsou jeden diferenční proudový konvejory DVCC a dva proudové konvejory druhé generace CCII+, dále v obvodu jsou dva uzemněné kondenzátory a čtyři odpory. Dva rezistory z toho jsou uzemněné. Tento obvod může realizovat všechny standardní filtrační funkce současně: dolní propust, horní propust, pásmová propust, pásmová zadrž, fázovací článek. Navrhovaný obvod má výhody v ortogonálním řízení rezonanční uhlové frekvence, v činiteli jakosti a také nízké aktivní a pasivní citlivosti. Obvod může tedy získat až pět standardních filtračních funkcí současně s ohledem na to, že využívá jen dva kondenzátory, přičemž obvod nevyžaduje změny v pasivních součástkách realizovat různé funkce filtru. Univerzální filtr 2. řádu s jedním vysoko impedančním vstupem je znázorněn na Obr. 4.1.



Obr. 4.1: Univerzální filtr 2. řádu s jedním vysoko impedančním vstupem

Přenosové funkce obvodu z Obr. 4.1 lze vyjádřit podle [10] takto:

$$\frac{U_{\text{výst1}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{G_1 G_2 G_3}{p^2 C_1 C_2 G_3 + p C_1 G_1 G_2 + G_1 G_2 G_3} \quad (4.1)$$

$$\frac{U_{\text{výst2}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{-p C_1 G_1 G_3}{p^2 C_1 C_2 G_3 + p C_1 G_1 G_2 + G_1 G_2 G_3} \quad (4.2)$$

$$\frac{U_{\text{výst3}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{-p^2 C_1 C_2 G_3}{p^2 C_1 C_2 G_3 + p C_1 G_1 G_2 + G_1 G_2 G_3} \quad (4.3)$$

$$\frac{U_{\text{výst4}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{p^2 C_1 C_2 G_3 + G_1 G_2 G_3}{p^2 C_1 C_2 G_3 + p C_1 G_1 G_2 + G_1 G_2 G_3} \quad (4.4)$$

$$\frac{U_{\text{výst5}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{p^2 C_1 C_2 G_3 + -p C_1 G_1 G_2 \frac{G_3}{G_4} + G_1 G_2 G_3}{p^2 C_1 C_2 G_3 + p C_1 G_1 G_2 + G_1 G_2 G_3} \quad (4.5)$$

Ze vzorců (4.1) – (4.5) je zřejmé, že filtru typu dolní propust je na $U_{\text{výst1}}$, pásmová propust $U_{\text{výst2}}$, horní propust $U_{\text{výst3}}$, pásmová zadrž $U_{\text{výst4}}$ a fázovací členek $U_{\text{výst5}}$.

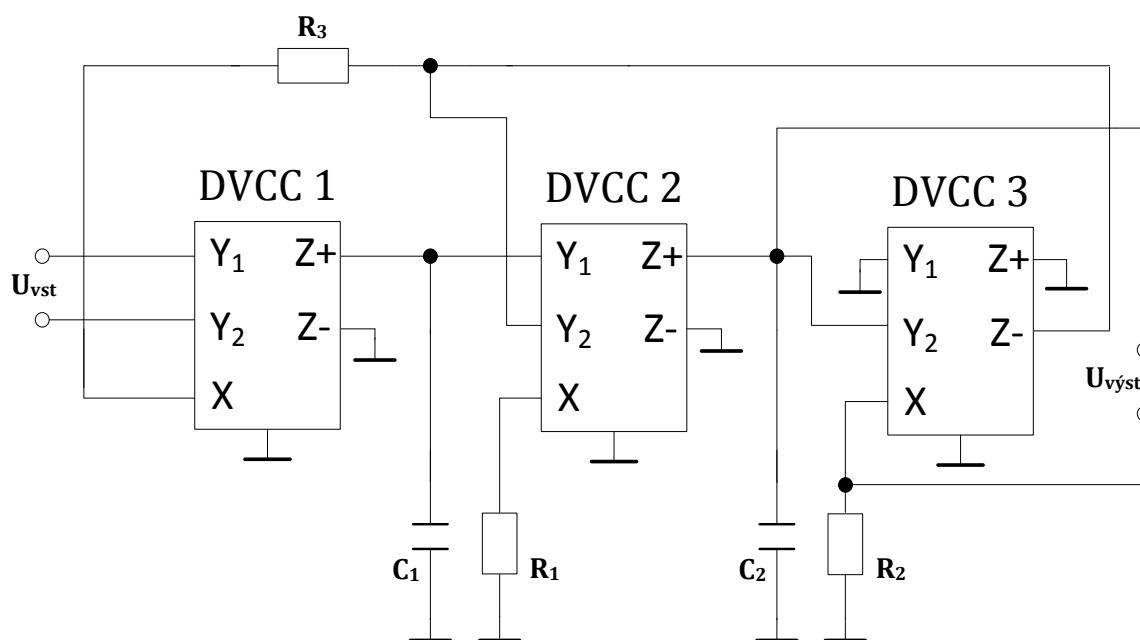
Ve všech případech, rezonanční úhlová frekvence ω_0 a činitel jakosti Q jsou dány vztahy:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4.6)$$

$$Q = \frac{1}{R_3} \sqrt{\frac{C_2 R_1 R_2}{C_1}} \quad (4.7)$$

4.2. REALIZACE SYMETRICKÉHO ZAPOJENÍ MODIFIKACE 1

V navrhovaném obvodu jsem použil zapojení, které jsem zmínil o kapitulu výše a tento obvod jsem obměnil. Aplikoval jsem na tento obvod diferenční zapojení. Oproti originálnímu zapojení jsem ve svém obvodu místo jednoho diferenčního proudového konveju DVCC a dvou proudových konveju druhé generace CCII+ použil tři diferenční proudové konveju DVCC. Zapojení dále obsahuje tři odpory, z toho jsou dva odpory (R_1 , R_2) uzemněné a dva kondenzátory, které jsou také uzemněné. Obvod se liší počtem odporů oproti zapojení, z kterého jsme vycházeli, ten obsahoval čtyři odpory. Při simulaci bylo zjištěno že odpor R_4 , jak vidíme na Obr. 4.1, je zapojen v sérii s nekonečnou impedancí a byl v obvodu „zcela“ zbytečně, tudíž v zapojení na Obr. 4.2 již není. Obvod se ještě liší tím, že jsme do prvního diferenčního proudového konveju DVCC 1 přivedli proud i do druhého vstupu Y_2 , a u třetího DVCC 3 jsme využili principu, o kterém bylo zmíněno v kapitole výše 3.2, který byl znázorněn na Obr. 3.9 s využitím DVCC 3 jeho druhé vstupní brány Y_2 , proud tedy již neteče do vstupu Y_{1+} , ale teče do vstupu Y_2 . Toto přepojení se odrazilo na tom, že jsme museli přepojit i výstup Z_{1+} do výstupu Z_{1-} , protože nám výsledná přenosová funkce vycházela chybně ve jmenovateli. Navrhovaný obvod s diferenční strukturou můžeme vidět na Obr. 4.2. Tento obvod realizuje po úpravě už jenom tři standardní filtrační funkce, kterou je pásmová propust, horní propust a pásmová zadrž, což je jeho nevýhoda oproti originálnímu zapojení. Tyto funkce budou popsány v následujících kapitolách



Obr. 4.2: Realizace symetrického zapojení s filtrem pásmová propust

Zapojení, které vidíme výše na Obr. 4.2, tak jeho přenosová funkce, může být vyjádřena takto:

$$\frac{U_{\text{výst}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{-p^2 C_1 R_2}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_3 + 1} \quad (4.8)$$

Z přenosové funkce (4.8) je patrné, že se jedná o filtr typu pásmová propust (PP) na výstupu $U_{\text{výst}}$. Oproti přenosové funkci (4.3) v originálním zapojení, si můžeme všimnout, že obvod v diferenčním zapojení získává v přenosové funkci v čitateli 2, tudíž se nám přenosová funkce (4.8), zvětšila dvojnásobně oproti přenosové funkci (4.2) v nediferenčním zapojení.

Z funkce získáváme, rezonanční úhlovou frekvenci ω_0 a činitel jakosti Q , které mohou být vyjádřeny takto:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}}, \quad (4.9)$$

$$Q = \frac{1}{R_3} \sqrt{\frac{C_2 R_1 R_2}{C_1}} \quad (4.10)$$

Z těchto dvou rovnic (4.9) a (4.10) je patrné, že rezonanční úhlová frekvence ω_0 a činitel jakosti Q vychází stejně jako u originálního zapojení bikvadratického filtru s jedním vysoko impedančním vstupem. U rovnice (4.10) si můžeme všimnout, že i v diferenční podobě neztratil rezistor R_3 měnit činitel jakosti Q nezávisle na úhlové frekvenci ω_0 , jako u obvodu s nediferenční strukturou.

Hodnoty pro simulaci byly navrženy tak, že činitel jakosti $Q = 1$, mezní kmitočet byl zvolen $f_0 = 1$ MHz. Dále byly zvoleny kondenzátory $C_1 = 100$ pF a $C_2 = 100$ pF a rezistor $R_2 = 1$ k Ω .

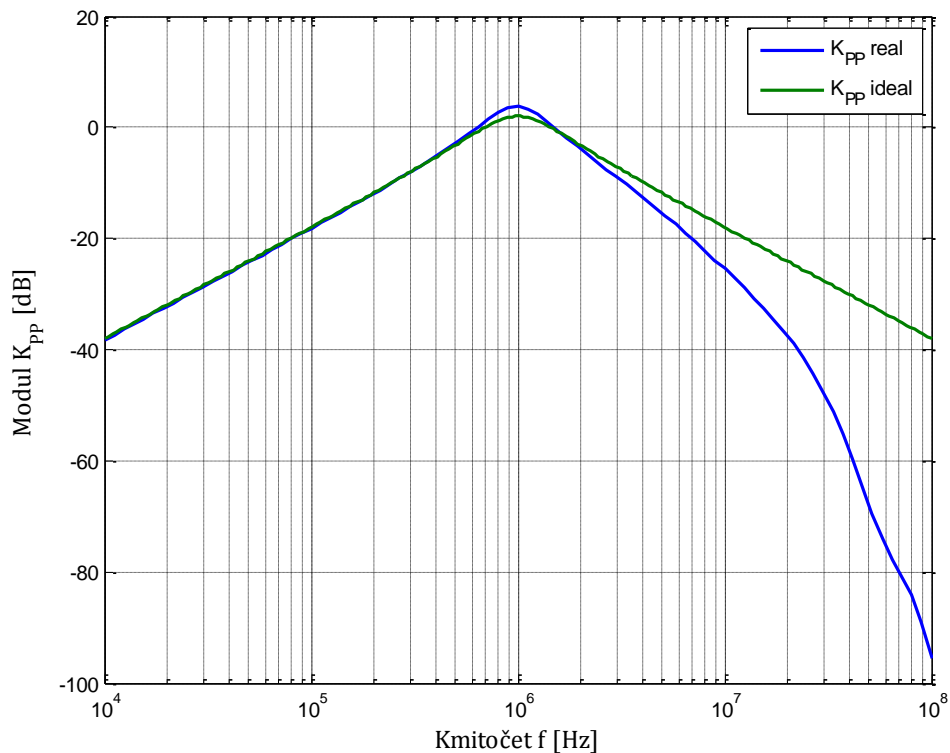
Ostatní rezistory v obvodu byly dopočítány pomocí rovnic pro úhlovou frekvenci (4.9) a činitel jakosti (4.10), ze kterých byly vyjádřeny tyto vztahy:

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \quad (4.11)$$

$$R_1 = \frac{1}{C_1 C_2 R_2 (2 \cdot \pi \cdot f_0)^2}, \quad (4.12)$$

$$R_3 = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{C_2 R_1 R_2}{C_1}} \quad (4.13)$$

Ze vztahů jsme získaly hodnoty rezistorů $R_1 = 2535\Omega$ a $R_3 = 1592\Omega$, tyto hodnoty dále byly zaokrouhleny na stovky, tudíž $R_1 \doteq 2,5k\Omega$ a $R_3 \doteq 1,6k\Omega$. Takto vypočtené hodnoty byly vloženy do prostředí MATLAB, ze kterého jsme realizovali grafické znázornění, které můžeme vidět na Obr. 4.3.

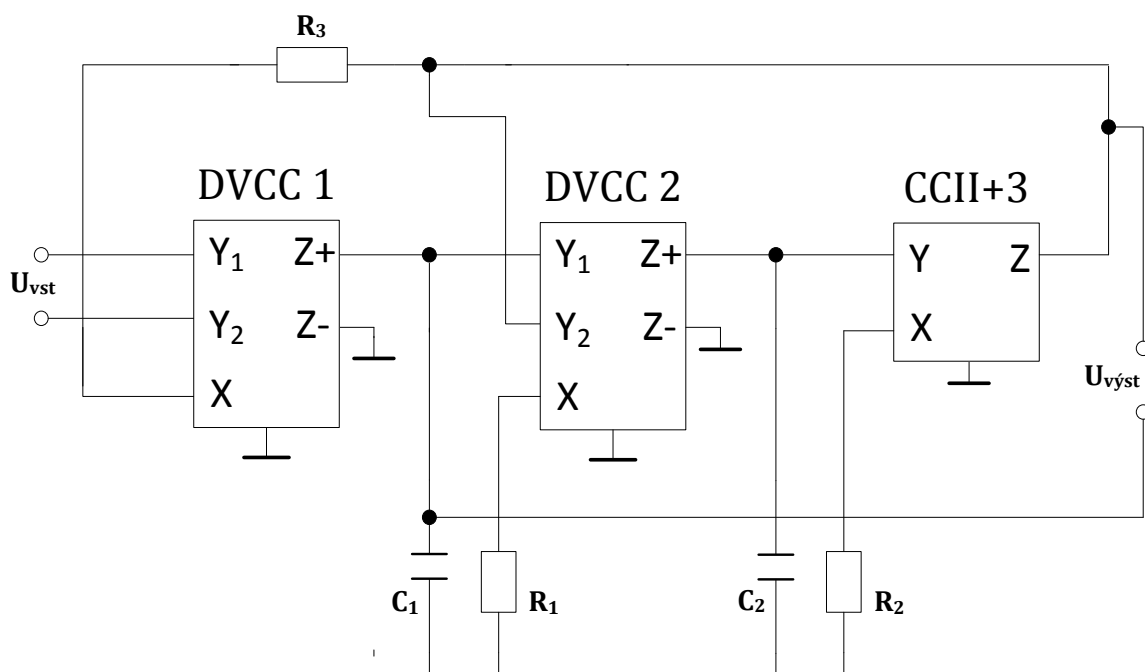


Obr. 4.3: Znázornění filtru pásmové propusti (PP), při $f_0 = 1\text{MHz}$

Na Obr. 4.3 je znázorněna obecná charakteristika, která vychází z přenosové funkce (4.8), jedná se o filtr typu pásmová propust (PP). Obr. 4.3 obsahuje, jak ideální, tak reálný průběh, pracující na mezním kmitočtu $f_0 = 1\text{MHz}$. Z grafu je patrné, že odsimulovaný průběh se velmi podobá tomu teoretickému. Pokles je způsoben použitím modelu aktivního prvku. Při simulaci jsme ovlivněny jeho reálnými vlastnostmi.

4.3. REALIZACE SYMETRICKÉHO ZAPOJENÍ MODIFIKACE 2

Jednou z dalších modifikací symetrického zapojení z výchozího obvodu [10], který je na Obr. 4.1, je filtrační funkce horní propust. Tento obvod obsahuje oproti realizaci symetrického zapojení modifikace 1 zobrazeného na Obr. 4.2, jenom dva diferenční proudové konvejory DVCC (DVCC 1 a DVCC 2), a jeden proudový konvektor druhé generace CCII (CCII+3). Dále stejný počet a stejné zapojení rezistorů a kondenzátorů, jako tomu bylo v předcházející kap. 4.2. výše. Další změnou oproti tomuto zapojení je v diferenčním výstupu, kde kladná svorka je připojena u třetího proudového konvektoru druhé generace CCII+3 k výstupu Z a záporná svorka je připojena nad kondenzátorem C_1 .



Obr. 4.4: Realizace symetrického zapojení s filtrem horní propust

Přenosovou funkci pro tento obvod, který je na Obr. 4.4 lze vyjádřit takto:

$$\frac{U_{\text{výst}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_3 + 1} \quad (4.14)$$

Z přenosové funkce (4.14) je zřejmé, že se jedná o filtr typu horní propust (HP) na výstupu $U_{\text{výst}}$. Z této funkce dostaneme činitel jakosti Q a rezonanční úhlovou frekvenci ω_0 .

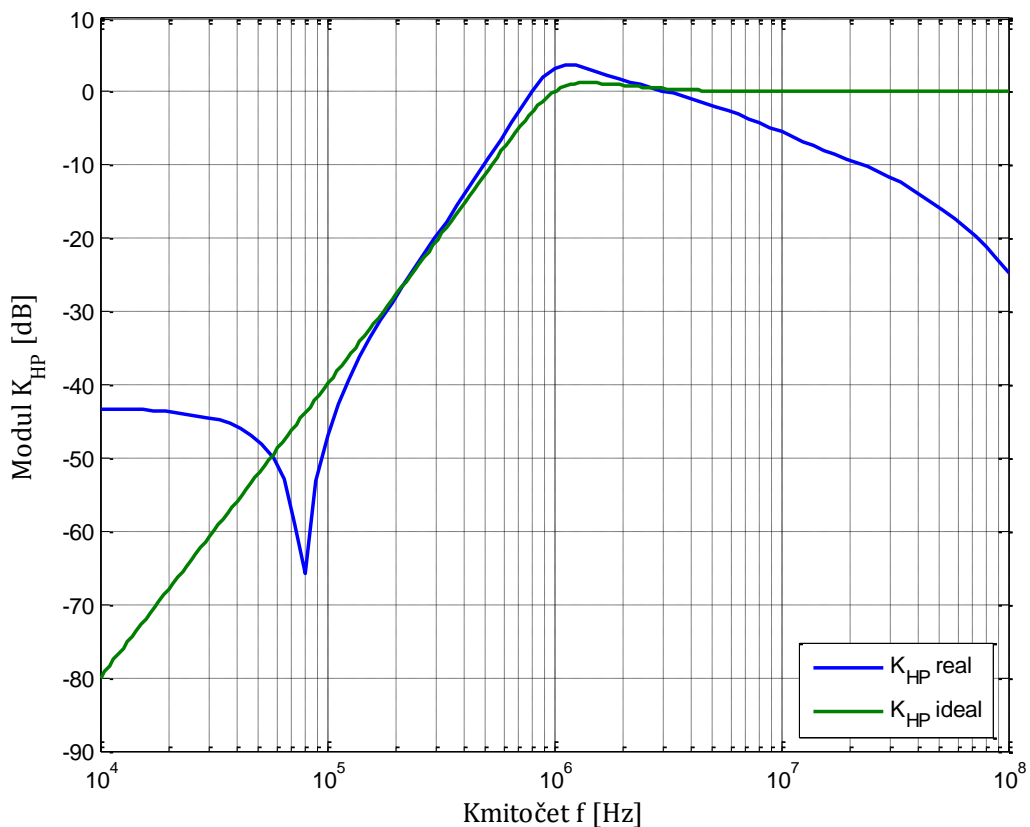
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}}, \quad (4.15)$$

$$Q = \frac{1}{R_3} \sqrt{\frac{C_2 R_1 R_2}{C_1}} \quad (4.16)$$

Jak můžeme vidět tak rovnice (4.15) a (4.16) se oproti univerzálnímu filtru 2. řádu a oproti symetrickému zapojení, kde jsme získali filtrační funkci pásmové propusti, rezonanční úhlová frekvence a činitel jakosti nezměnili. Rezistor R_3 tedy neztratil tu vlastnost, že může měnit činitel jakosti Q nezávisle na rezonanční úhlové frekvenci ω_0 .

Stejně jako v předchozím případě v kap. 4.2. výše, byly pro simulaci navrženy stejné hodnoty jako pro filtrační funkci pásmové propusti. Jsou jimi mezní kmitočet, který byl navržen $f_0 = 1$ MHz, činitel jakosti $Q = 1$. Dále byly zvoleny kondenzátory $C_1 = 100$ pF a $C_2 = 100$ pF a rezistor $R_2 = 1$ k Ω .

Ostatní dva rezistory jsme dopočítaly pomocí rovnic (4.12) a (4.13), které byly uvedeny a použity pro předchozí filtr (PP) v kap. 4.2. Hodnoty tedy jsou pro $R_1 \doteq 2,5$ k Ω a $R_3 \doteq 1,6$ k Ω u obou zátěží zůstaly hodnoty shodné. Na Obr. 4.5 vidíme ideální i reálnou funkci horní propusti.



Obr. 4.5: Znáznornění filtru horní propusti (HP) při $f_0 = 1$ MHz

4.4. REALIZACE SYMETRICKÉHO ZAPOJENÍ MODIFIKACE 3

The diagram shows a three-stage active filter circuit. The first stage is a DVCC 1 with inputs Y_1 , Y_2 , and X , and outputs Z^+ and Z^- . The second stage is a DVCC 2 with inputs Y_1 , Y_2 , and X , and outputs Z^+ and Z^- . The third stage is a CCII+3 with inputs Y and X , and output Z . The circuit includes resistors R_1 , R_2 , R_3 , capacitors C_1 , C_2 , and a feedback loop with R_3 . The output is labeled U_{vyst} .

Obr. 4.6: Realizace symetrického zapojení s filtrem pásmová zadrž

Přenosovou funkci tohoto zapojení Obr. 4.6, můžeme vyjádřit takto:

$$\frac{U_{\text{výst}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + 1}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_3 + 1} \quad (4.17)$$

Na této přenosové funkci (4.17) je patrné, že se jedná o filtrační funkci pásmové zádrže (PZ). Oproti přenosové funkci u univerzálního filtru 2. řádu vycházející z [10] se u symetrického zapojení objevila v čitateli 2 u Laplaceova operátoru p^2 a zdvojnásobuje tuto přenosovou funkci, ale jen po mezním kmitočtu $f_0 = 1\text{MHz}$, pro který je tato filtrační funkce navržena. Před mezním kmitočtem nikoliv, protože v přenosové funkci (4.17) v čitateli neobsahuje dvojnásobnou hodnotu u jedničky.

Z této přenosové funkce (4.17) dále lze vyjádřit činitel jakosti Q a rezonanční úhlovou frekvenci ω_0 .

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4.18)$$

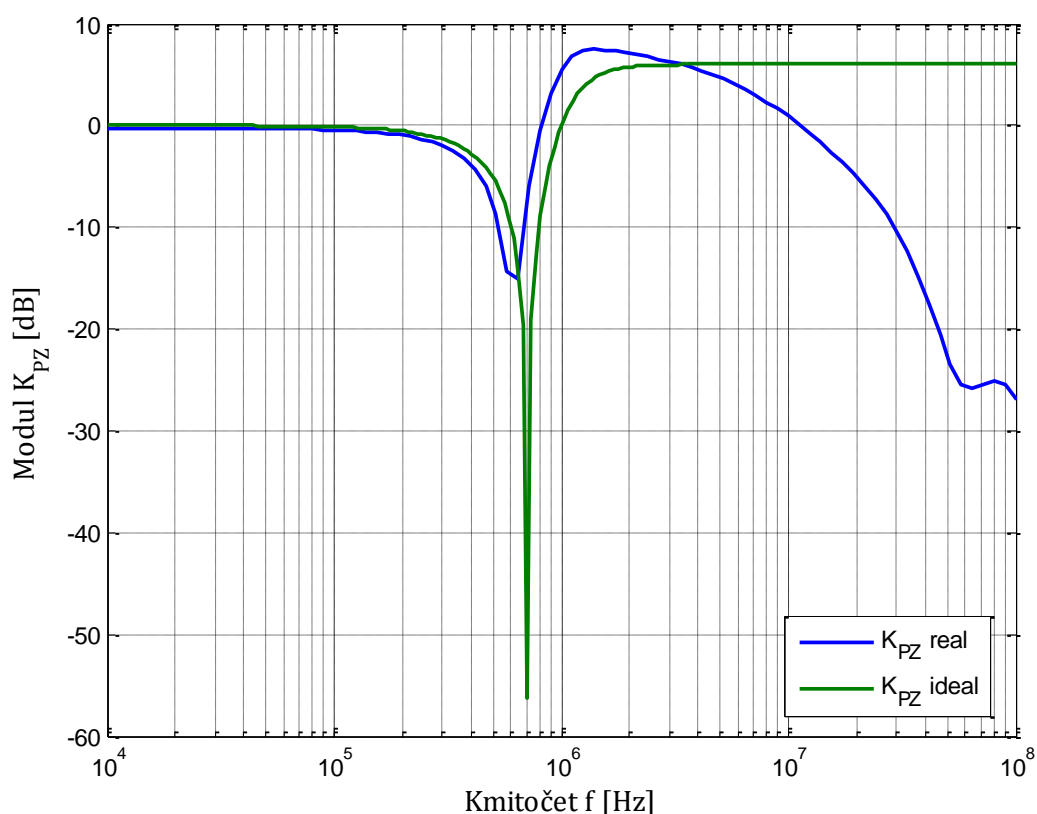
$$Q = \frac{1}{R_3} \sqrt{\frac{C_2 R_1 R_2}{C_1}} \quad (4.19)$$

Jako tomu bylo v předchozích třech případech, jak u zapojení z něhož tento obvod vychází [10] a dvou předcházejících realizovaných symetrických zapojení modifikací 1 a modifikací 2 se rezonanční úhlová frekvence ω_0 (4.18) a činitel jakosti Q (4.19) nezměnili a tudíž neztratili ani své vlastnosti.

Pro následnou simulaci, identicky jako u předchozích dvou realizovaných symetrických zapojení, které se nacházejí v kap.4.2. a v kap. 4.3., byl z přenosové funkce pásmové zádrže (4.17) navržen činitel jakosti $Q = 1$, zatížení rezistorem $R_2 = 1\text{k}\Omega$, shodující se dva kondenzátory $C_1 = 100\text{pF}$ a $C_2 = 100\text{pF}$ a mezní kmitočet $f_0 = 1\text{MHz}$.

Potřebné bylo dopočítání zbývajících dvou rezistorů R_1 a R_3 pomocí rovnic, (4.12) a (4.13), které byly uvedeny a použity pro předcházející filtry (pásmové propusti) a (horní propusti) v kap. 4.2. a kap. 4.3. Hodnoty obou zatížení zůstaly shodné. Z výchozích rovnic (4.12) a (4.13), tedy vyšly stejné hodnoty jak pro $R_1 \doteq 2.5\text{k}\Omega$, tak pro $R_3 \doteq 1.6\text{k}\Omega$.

Na následujícím Obr. 4.7 vidíme jak ideální, tak reálnou filtrační funkci pásmové zádrže (PZ).



Obr. 4.7: Znázornění filtru pásmové zádrže (PZ) při $f_0 = 1$ MHz

Na předcházejícím Obr. 4.7, který vidíme výše, je znázorněna obecná charakteristika, která vychází z přenosové funkce (4.17), jedná se o filtrační funkci typu pásmová zádrž (PZ). Obr. 4.5 obsahuje, jak teoretický, tak reálný průběh. Oba průběhy byly navrženy na mezní kmitočet $f_0 = 1$ MHz, ale jak vidíme, tak mezní kmitočet u obou případů je okolo mezního kmitočtu $f_0 = 650$ kHz.

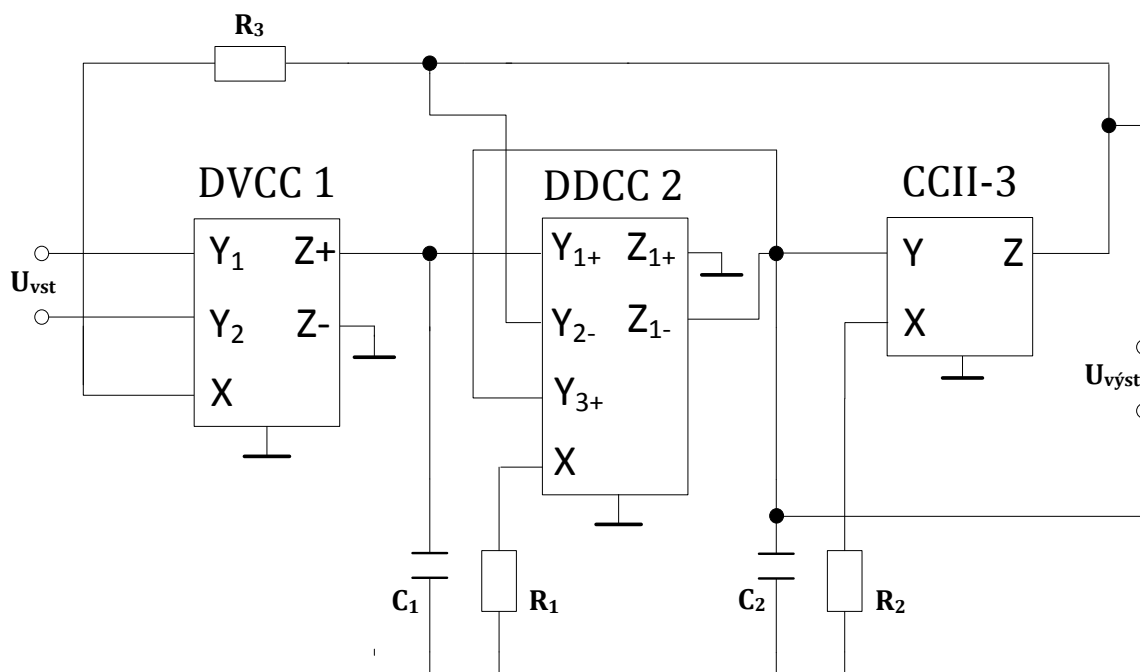
Tento neočekávaný posun byl způsoben 2 u Laplaceova operátoru p^2 . Která ještě zapříčinila špatné chování modulu K_{PZ} u obou průběhů.

U reálného průběhu si můžeme všimnout, že před mezním kmitočtem od kmitočtu $f = 10^4$ Hz do mezního kmitočtu $f_0 = 1$ MHz, se reálný průběh takřka podobá ideálnímu průběhu a jejich modul K_{PZ} je správně okolo 0 dB, ale po mezním kmitočtu jak průběh reálný, tak průběh ideální je vynásoben dvakrát a jejich modul K_{PZ} , je u ideálního průběhu 6 dB a u reálného průběhu až 8 dB.

Tyto průběhy nejevily moc dobré vlastnosti, proto jsme se snažili tuto situaci vylepšit, abychom modul K_{PZ} dostali po mezním kmitočtu $f_0 = 1$ MHz na 0 dB. Tyto další kroky budou popsány v následující kapitole.

4.5. REALIZACE SYMETRICKÉHO ZAPOJENÍ MODIFIKACE 4

Další z možností jak upravit nesymetrické zapojení na symetrické, které vychází z Obr. 4.1 [10]. Tento obvod je obměněn tím, že oproti předchozím třem případům, už toto zapojení neobsahuje dva diferenční proudové konvejory DVCC (DVCC 1 a DVCC 2) a jeden proudový konvektor druhé generace CCII+ 3, jako předcházející dvě realizace symetrického zapojení modifikace 1 a modifikace 2, které jsou popsány v kap. 4.3. a v kap. 4.4.. Symetrické zapojení na Obr. 4.8 zahrnuje tři aktivní prvky v podobě jednoho diferenčního proudového konvektoru DVCC 1, jednoho diferenčního rozdílového proudového konvektoru DDCC 2 a jeden negativní proudový konvektor druhé generace CCII-3. Zapojení a počet se z pohledu pasivních prvků nezměnil. Větší změnou tohoto obvodu je, že byl využit rozdílový diferenční proudový konvektor DDCC 2, kde výstup již nejde Z_{1+} , nýbrž ze Z_{1-} a u něhož nám ještě vznikla zpětná cesta z brány Y_{3+} připojená do společného uzlu mezi kondenzátorem C_2 , DDCC 2 a DVCC 3, to mělo za následek, že nám v přenosové funkci (4.20) u Laplaceova operátoru zmizela z čitatele 2 a tudíž ztratila vlastnost za mezním kmitočtem vynásobit funkci filtru a posun mezního kmitočtu f_0 . Cílem bylo použití diferenčního proudového konvektoru DVCC a diferenčního rozdílového proudového konvektoru DDCC v jednom společném zapojení a dostat modul K_{PZ} po mezním kmitočtu $f_0 = 1 \text{ MHz}$ na 0 dB.



Obr. 4.8: Realizace symetrického zapojení s filtrem pásmové zadržky (PZ) při využití proudových konvektorů (DVCC, DDCC, CCII-)

Přenosovou funkci (4.20) tohoto diferenčního zapojení lze vyjádřit takto:

$$\frac{U_{\text{výst}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + 1}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p(C_1 R_3 + C_1 R_2) + 1} \quad (4.20)$$

Dále z této přenosové funkce (4.20) lze získat činitel jakosti Q a rezonanční úhlovou frekvenci ω_0 a vyjádřit je takto:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4.21)$$

$$Q = \frac{1}{R_3 + R_2} \sqrt{\frac{C_2 R_1 R_2}{C_1}} \quad (4.22)$$

Z předcházejících rovnic (4.21) a (4.22) je patrné, že se nám rezonanční úhlová frekvence (4.21) nezměnila oproti originálnímu zapojení Obr. 4.1 a dalším třem podobě jdoucích realizovaných symetrických zapojení v kap. 4.2. - 4.4.. Ovšem činitel jakosti (4.22) je již jiný, ale stále zátěž R_3 neztratila tu vlastnost, že když měníme její hodnotu, tak neovlivňuje rezonanční úhlovou frekvenci, nýbrž jenom činitel jakosti.

Pro následující simulaci byly navrženy hodnoty tak, že činitel jakosti Q zatím nebude zvolen až dále pro symetrické zapojení, které bude předlohou pro praktické měření, ale nejdříve bude poukázáno na Obr. 4.9 o realizace symetrického zapojení s filtrační funkcí pásmové zadrže s různými typy hodnot rezistoru R_3 , jak mění činitel jakosti nezávisle na rezonanční úhlové frekvenci. Pro tento filtr byl zvolen mezní kmitočet $f_0 = 30$ kHz. Dále byly navrženy kondenzátory $C_1 = 10$ nF a $C_2 = 10$ nF a rezistor $R_2 = 220 \Omega$.

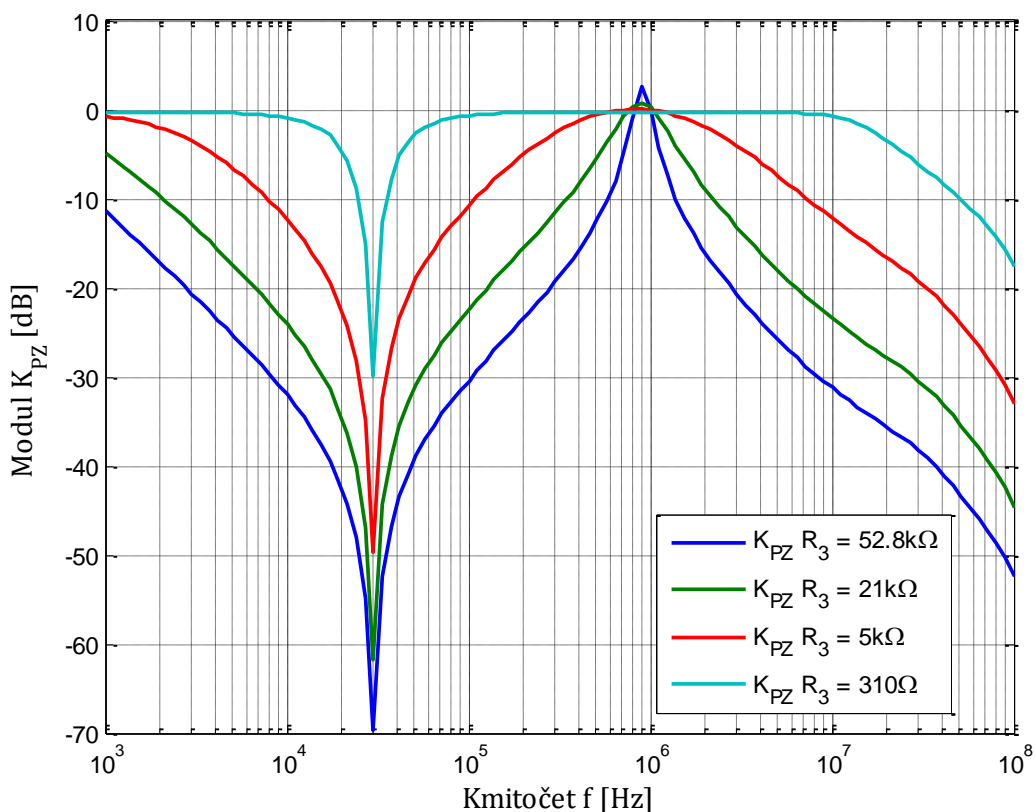
Ostatní odpory byly dopočítány pomocí rovnic pro úhlovou frekvenci (4.21) a činitel jakosti (4.22), ze kterých byly vyjádřeny tyto vztahy:

$$R_1 = \frac{1}{C_1 C_2 R_2 (2 \cdot \pi \cdot f_0)^2}, \quad (4.23)$$

$$R_3 = \frac{1}{Q C_1 \omega_0} - R_2 \quad (4.24)$$

Ze vztahu (4.23) jsme získali hodnotu rezistoru $R_1 = 1280\Omega$. Pro simulaci v prostředí OrCAD 10.3, aby se poukázalo na to, že rezistor R_3 mění činitel jakosti Q nezávisle na rezonanční úhlové frekvenci ω_0 . Zvolili jsme hodnoty činitele jakosti $Q = \{1, 0.1, 0.025, 0.01\}$, k němu byly dopočítány pomocí rovnice (4.24), patřičné hodnoty $R_3 = \{310\Omega, 5.1k\Omega, 21k\Omega, 52.8k\Omega\}$. Následně byly tyto hodnoty odsimulovány.

Na následujícím Obr. 4.9 můžeme tuto vlastnost odporu R_3 sledovat.



Obr. 4.9 Znáznornění filtru pásmové zádrže (PZ) při $f_0 = 30$ kHz s různými hodnotami rezistoru R_3

Na Obr. 4.9 je znázorněna filtrační funkce pásmové zádrže (PZ), vidíme zde průběhy s různými hodnotami rezistoru R_3 . Filtr pracuje na mezním kmitočtu $f_0 = 30$ kHz, jedná se o filtrační funkci, kterou jsme získali při realizaci symetrického zapojení na Obr. 4.8.

Z Obr. 4.9 je také patrné, že čím větší hodnotu rezistoru R_3 zvolíme, tím u filtru pásmové zádrže získáme menší činitel jakosti Q . Tudíž největší činitel jakosti je při zvolení rezistoru $R_3 = 310\Omega$ a nejmenší zase u odporu $R_3 = 52.8k\Omega$. To by bylo velmi výhodné, takto měnit činitel jakosti, ale z Obr. 4.9 je také zřejmé že čím větší odpor R_3 , tím dříve klesá průběh pásmové zádrže. Tedy například rezistor hodnoty $R_3 = 52.8k\Omega$ klesá dříve než rezistor $R_3 = 310\Omega$. Tato nevýhoda, neboli špatná vlastnost klesání průběhu u tohoto symetrického zapojení vedla k tomu, že jsme v další realizaci

diferenčního zapojení, který můžeme vidět na Obr. 4.10, odstranili zátěž R_3 , abychom získali lepší průběh pásmové zadržky. Z Obr. 4.9 jsou skutečné hodnoty činitele jakosti Q v Tab. 4.1.

Tab. 4.1: Hodnoty činitele jakosti Q z teorie a simulace v závislosti na rezistoru R_3

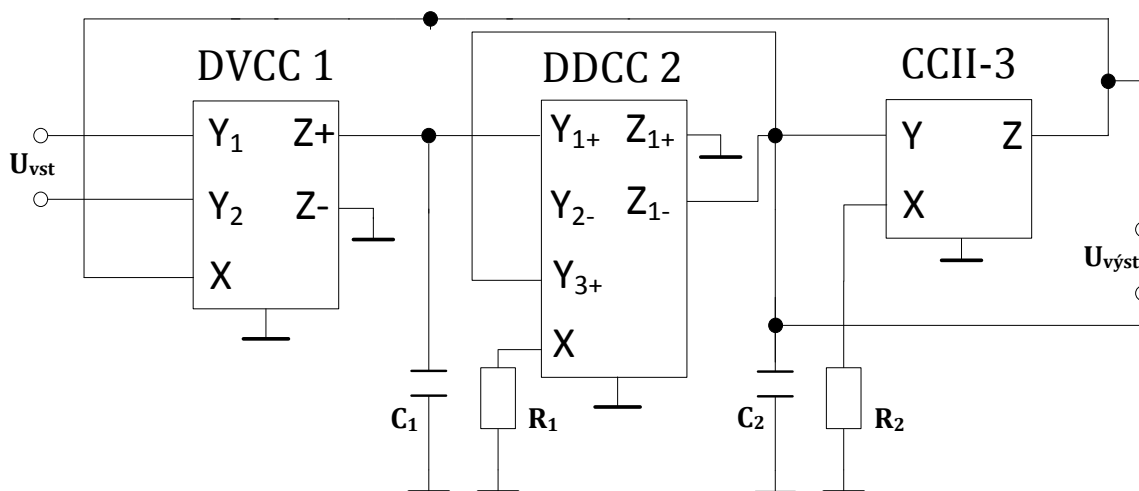
R_3	Q - teorie	Q - simulace
310Ω	1	0.9311
$5.1k\Omega$	0.1	0.1098
$21k\Omega$	0.025	0.0291
$52.8k\Omega$	0.01	0.0195

Hodnoty činitele jakosti Q pro simulaci jsme získali pomocí prostředí OrCAD 10.3, kde jsme pomocí kursorů zjistili šířku pásma B a pak podle rovnice (4.25), dopočítali Q . Hodnoty které jsme získali simulací se blíží hodnotám, které jsme očekávali.

$$Q = \frac{f_0}{B} \quad (4.25)$$

Jak bylo ukázáno na Obr. 4.9, změnou hodnoty rezistoru R_3 dochází k žádoucí změně činitele jakosti filtru. Bohužel však změnou rezistoru R_3 dochází k zásadní degradaci modulu přenosové funkce na vyšších kmitočtech.

Na Obr. 4.10 je uvedeno zapojení, které vychází ze struktury z Obr. 4.8. Pouze došlo k odstranění rezistoru R_3 . Tato změna v obvodu vedla k lepšímu výslednému průběhu pásmové zadržky, ale s tím důsledek, že již nedovoluje jednoduchou změnu činitele jakosti. Toto zapojení je zde analyzováno z toho důvodu, že v rámci další práce bylo i prakticky realizováno a chování ověřeno experimentálními měřeními.



Obr. 4.10 Symetrické zapojení bez rezistoru R_3

Přenosová funkce (4.26) této realizované diferenční struktury se díky odstranění zátěže R_3 oproti přenosové funkci (4.20), zejména ve jmenovateli zjednodušila a lze ji vyjádřit takto:

$$\frac{U_{\text{výst}}}{U_{\text{vst}}} = \frac{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + 1}{p^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + p C_1 R_2 + 1} \quad (4.26)$$

Z takovéto přenosové funkce, dále můžeme získat rezonanční úhlovou frekvenci ω_0 a činitel jakosti Q a lze je vyjádřit takto:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (4.27)$$

$$Q = \sqrt{\frac{C_2 R_1}{C_1 R_2}} \quad (4.28)$$

Z rovnic (4.27) a (4.28) je zjevné, že se rezonanční úhlový kmitočet (4.27) nezměnil oproti původnímu zapojení z Obr. 4.1 a dalším čtyřem po sobě jdoucích realizovaných symetrických zapojení kap. 4.2 - 4.5. Činitel jakosti dle (4.28) však již nelze měnit jedním z pasivních prvků, aniž by nedošlo k ovlivnění rezonanční úhlové frekvence.

Pro simulaci v prostředí OrCAD 10.3 byly navrženy následující hodnoty, mezní kmitočet zůstal stejný $f_0 = 30\text{kHz}$, jako u předchozí diferenční struktury Obr. 4.8, činitel jakosti byl zvolen $Q = 1$. Kondenzátory se také nezměnily vůči předešlému návrhu $C_1 = 10\text{nF}$ a $C_2 = 10\text{nF}$.

Z rovnic (4.27) a (4.28) byly dopočítány zbylé dva rezistory R_1 a R_2 pomocí následujících vztahů a lze je vyjádřit takto:

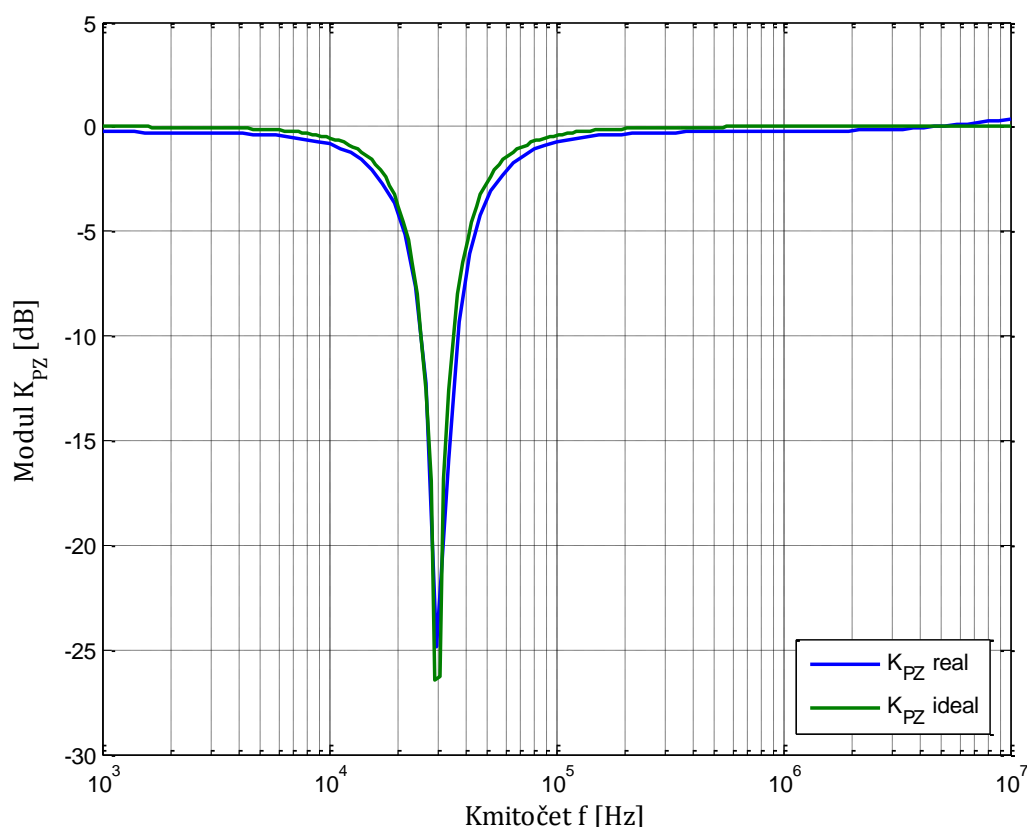
$$R_1 = \frac{1}{C_1 C_2 R_2 (2 \cdot \pi \cdot f_0)^2}, \quad (4.29)$$

$$R_2 = \frac{1}{Q C_1 \omega_0} \quad (4.30)$$

Z předcházejících rovnic (4.29) a (4.30), byly dopočítány rezistory $R_2 = 530\Omega$ a $R_1 = 531\Omega$

Pro následnou simulaci a dále pro experimentální měření tohoto symetrického zapojení, který je na Obr. 4.10. Byly zvoleny hodnoty rezistorů $R_1 = 510\Omega$ a $R_2 = 510\Omega$.

Obr. 4.11, který vidíme pod tímto textem, zobrazuje filtrační funkci pásmové zádrže, jakožto ideální průběh a i průběh reálný.



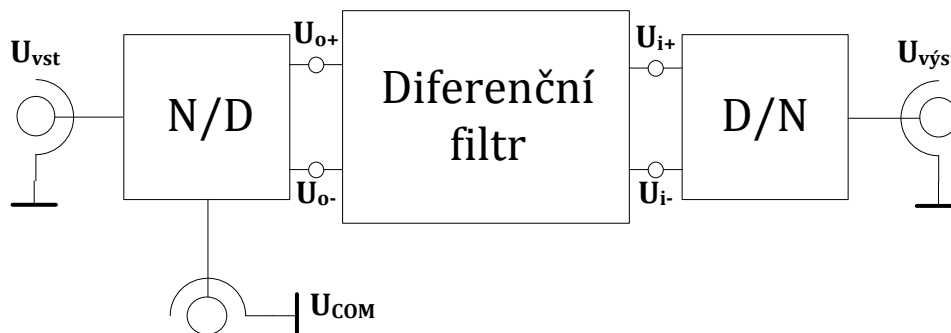
Obr. 4.11: Znázornění filtrační funkce (PZ) při $f_0 = 30\text{kHz}$ bez rezistoru R_3

Na předcházejícím Obr. 4.11 je zobrazen filtr pásmové zádrže, který pracuje na mezním kmitočtu $f_0 = 30\text{kHz}$. Můžeme si všimnout, že reálný průběh této filtrační funkce je téměř shodný s ideálním průběhem. Malé odlišení je u reálného průběhu, kde $K_{PZ} = -25\text{dB}$ a u ideálního průběhu je $K_{PZ} = -27\text{dB}$. Tento filtr pásmové zádrže (PZ) vycházející z symetrického zapojení, které je na Obr. 4.10 bude využito pro praktickou realizaci. Postup a jednotlivé kroky budou popsány v následující kapitole.

5. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

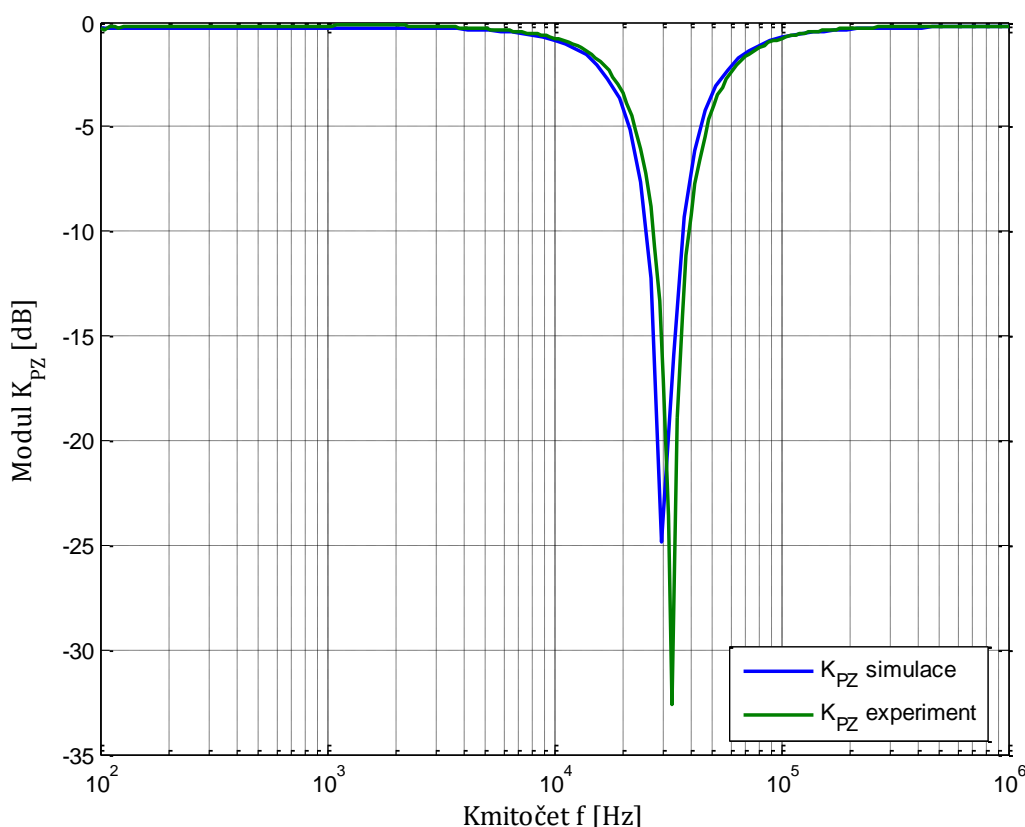
Pro praktickou část měření, byl zvolen kmitočtový filtr pásmové zadržky z předcházející kapitoly 4.5. pro upřesnění je na Obr. 4.10, je složený ze tří aktivní prvků, jednoho diferenčního proudového konveju DVCC, jednoho rozdílového diferenčního proudového konveju DDCC a negativním proudovým konvejorem druhé generace CCII-. Spolu s aktivními prvky tvoří obvod čtyři pasivní prvky, dva kondenzátory a dva rezistory. Pro experimentální měření byli využity dva univerzální proudové konvejory UCCX-0349_SMD [24], kde jeden UCCX-0349_SMD byl transformován na diferenční proudový konveju DVCC. Ostatní brány, které nebyly využity se uzemnily. Druhý UCCX-0349_SMD se modifikoval na diferenční rozdílový proudový konveju DDCC a využili jsme jeho vnitřního bloku, z něhož byl modifikován třetí aktivní prvek CCII-. Přenosová funkce (4.26) je zobrazena v kap. 4.5. výše. Pro měření byly navrženy veškeré potřebné hodnoty. Realizované symetrické zapojení na Obr. 4.10 bylo odsimulováno v prostředí OrCAD 10.3. Veškeré naměřené hodnoty a grafy jsme získali za pomoci obvodového analyzátoru 4395 A.

Jelikož se jedná o diferenční filtr a abychom mohli zrealizovat experimentální měření, muselo se přivedené nediferenční napětí převést na diferenční napětí, před symetrickým filtrem a za ním zase naopak, jakož tomu je na Obr. 5.1, kde je zobrazeno blokové schéma experimentálního měření. Pokud se jednalo o převodník nediferenčního napětí na diferenční, tak tento převodník byl zajištěn v podobě součástky AD8476 [20]. Převod diferenčního na nediferenční napětí bylo zajištěno v podobě součástky s označením AD8429 [21]. Kromě užitečného signálu U_{vst} , jsme ještě pomocí sumačních zesilovačů realizovaných integrovaným obvodem AD8271 [22], přivedli souhlasné napětí U_{COM} , kterým jsme byli schopni ověřit správnou činnost diferenčního zapojení spočívající v potlačení souhlasného signálu. K měření byla ještě potřebná deska ke kalibraci obvodového analyzátoru 4395 A.



Obr. 5.1 Blokové schéma pro experimentální měření

Pro návrh desek plošných spojů kmitočtového filtru pásmové zadržky byl využit freewarový Cadsoft program Eagle 6.5.0, kdy dokumentace k těmto deskám je uvedena v samostatných přílohách A až B. Modul přenosové funkce kmitočtového filtru získaného experimentálními měřeními je uveden na Obr. 5.2, který je porovnán s výsledky simulací.



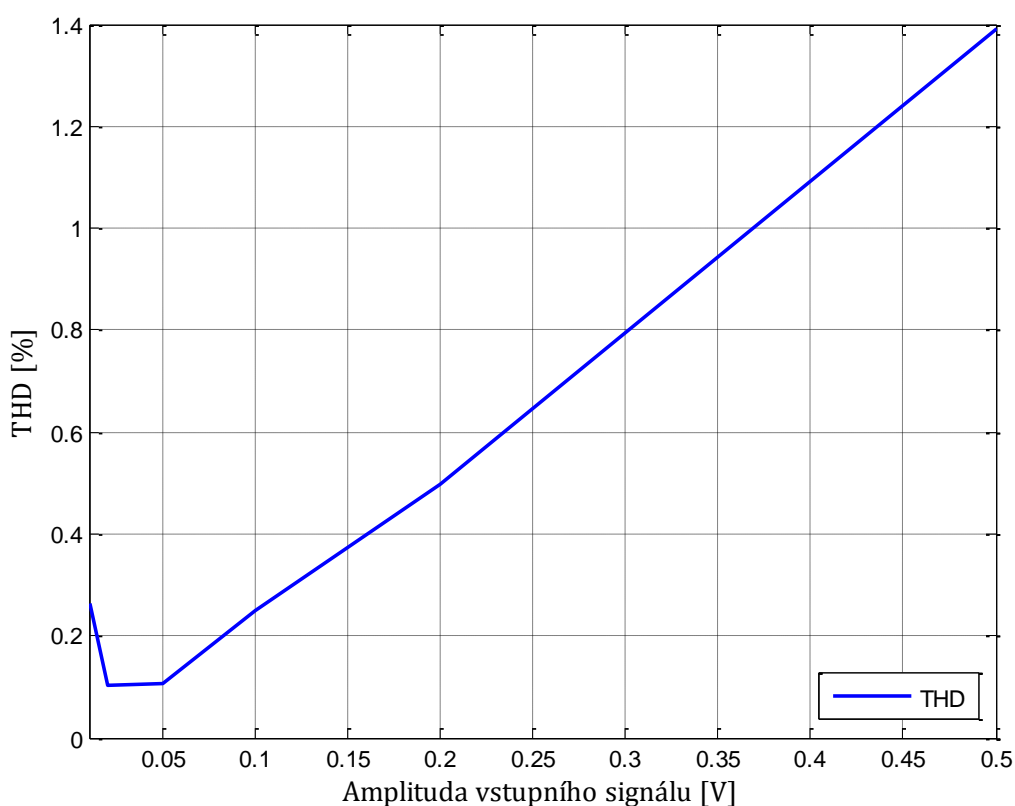
Obr. 5.2 Porovnání experimentálního měření pásmové zadržky s výsledky simulací

Výsledky experimentálního měření pásmové zadržky na Obr. 5.2 můžeme říci, že jsou velmi dobré v porovnání se simulací. Průběh simulace, která byla odsimulována v prostředí OrCAD 10.3, se bezmála shoduje s experimentálním průběhem. Nepatrný rozdíl je v mezním kmitočtu, který u simulovaného průběhu je $f_0 = 29,9\text{kHz}$ a u experimentálního měření je mezní kmitočet $f_0 = 33,1\text{kHz}$. Další rozdíl je v modulu přenosové funkce, kde u simulovaného průběhu je $K_{PZ\text{ SIM}} = -33,4\text{dB}$ a u experimentálního měření je $K_{PZ\text{ EXP}} = -24,7\text{dB}$. Originální grafické znázornění z experimentálního měření získaného z obvodového analyzátoru se nachází v příloze C.

Celkové harmonické zkreslení je definováno jako poměr vyšších harmonických složek ku základní harmonické složce, jak můžeme vidět v rovnici (5.1).

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \quad (5.1)$$

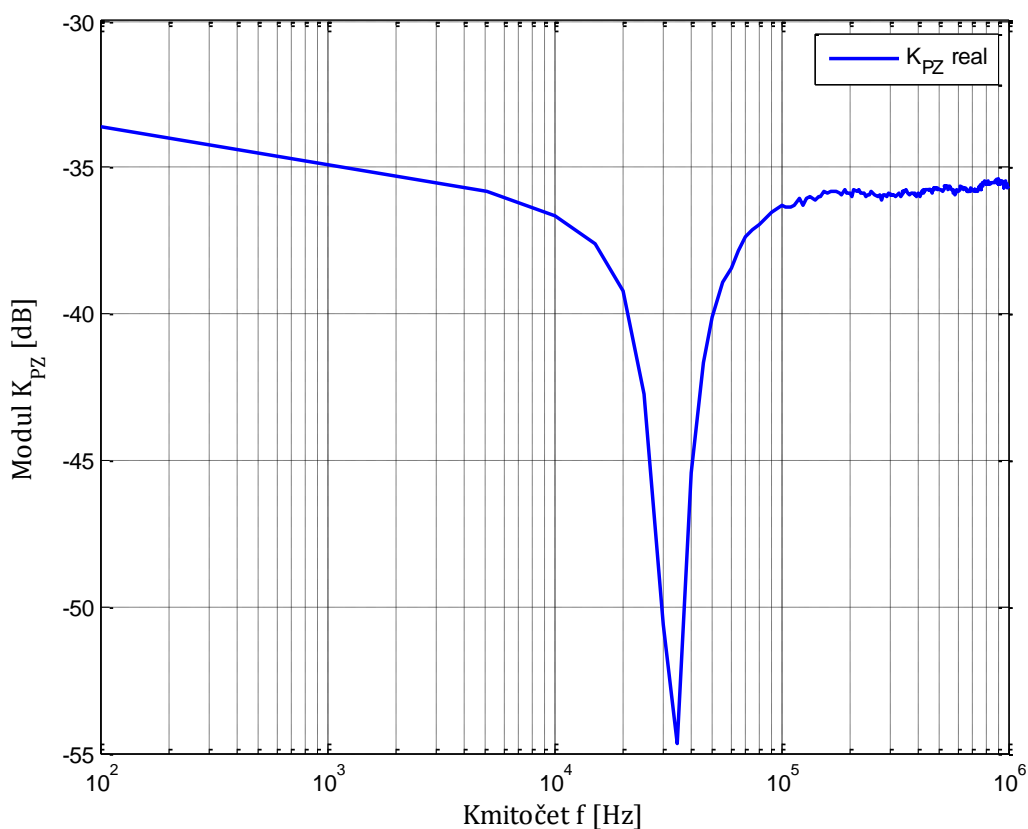
Při experimentálním měření jsme změřili prvních pět harmonických složek, tedy U_1 až U_5 . Pomocí rovnice (5.1) jsme vypočítali celkové harmonické zkreslení THD. Na Obr. 5.3. vidíme harmonické zkreslení filtru.



Obr. 5.3: Harmonické zkreslení filtru

Z Obr. 5.3 vyplývá, že harmonické zkreslení filtru je v širokém rozsahu amplitud vstupního signálu pod 1 %. Rostoucí průběh je způsoben saturací aktivního prvku.

Na dalším obrázku Obr. 5.4, můžeme vidět diferenční filtr a jeho schopnost potlačit souhlasný signál.



Obr. 5.4 Potlačení souhlasného signálu diferenčním filtrem

Schopnost potlačení souhlasného signálu diferenčním filtrem je ukázána na Obr. 5.4. Zapojení bylo buzeno souhlasným signálem o amplitudě -13 dBm. Jak je vidět z grafu na Obr. 5.4, souhlasný signál je potlačen minimálně o 35 dB. Originální výsledky z praktického měření se nachází v příloze C.

6. ZÁVĚR

V této práci jsem se zabýval problematikou kmitočtových filtrů a zaměřil se na filtry diferenční.

Na začátku práce se zabývám obecným popisem těchto filtrů z pohledu matematického vyjádření a následně možnou realizací a popisu vlastností symetrických i nesymetrických struktur využívající proudové konvejory. Symetrické proudové konvejory nám umožní větší variabilitu a výhodu při vytváření diferenčních struktur. Jak se takovéto struktury vytváří se věnuji v další části práce. Jak z pohledu vstupu, tak z pohledu výstupu symetrického a nesymetrického zapojení nebo vnitřní modifikací aktivního prvku.

V kapitole 4 se pak již věnuji samotnému návrhu symetrických filtrů vycházejících z nesymetrického prototypu 2. řádu, který byl uveden na Obr. 4.1. Tento nediferenční univerzální aktivní filtr dokáže realizovat všechny standardní filtrační funkce (DP), (HP), (PP), (PZ), (FČ). Z tohoto zapojení nesymetrického filtru byly navrženy čtyři diferenční struktury, které byly odsimulovány a z výsledků simulace byly sestaveny grafy, nacházející se v kap. 4.2. - 4.5. Poslední z těchto struktur byla předlohou pro praktickou část měření, kdy výsledky měření jsou v samostatné kapitole.

Závěrečná kapitola se zabývá experimentálním měřením Abychom mohli diferenční filtr změřit, bylo nutné kmitočtový filtr doplnit o převodníky nediferenčního napětí na diferenční a naopak, jelikož použité měřicí přístroje nejsou schopny přímo generovat a měřit diferenční napětí. Z výsledků měření kmitočtového filtru vyplynulo, že jeho chování se velmi blíží očekávaným průběhům. V rámci experimentálních měření jsme využili i možnost prezentovat schopnost potlačit souhlasné rušení diferenčních filtru, kdy do části převodníku nesymetrického napětí na symetrické jsme přiváděli souhlasný signál o amplitudě -13dBm. Měřením na výstupu filtru bylo pak zjištěno, že souhlasný signál byl potlačen o 35dB. V rámci měření pak bylo vyhodnoceno i harmonické zkreslení filtru, které v širokém rozsahu amplitud vstupního signálu je pod 1 %.

SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN, SYMBOLŮ A ZKRATEK

I_1	proud na vstupu [A]
I_2	proud na výstupu [A]
I_x	proud na uzlu X [A]
I_y	proud na uzlu Y [A]
I_z	proud na uzlu Z [A]
U_x	napětí na uzlu X [V]
U_y	napětí na uzlu Y [V]
U_z	napětí na uzlu Z [V]
U_{in}	vstupní napětí [V]
U_{out}	výstupní napětí [V]
ω_0	úhlová frekvence [s^{-1}]
f_0	mezní kmitočet [Hz]
K_U	přenos napětí
K_I	přenos proudu
$K(p)$	přenosová funkce
p	Laplaceův operátor
LP	dolní propust (Low-Pass)
HP	horní propust (High-Pass)
BP	pásmová propust (Band-Pass)
BR	pásmová zádrž (Band-Reject)
AP	fázovací článek (All-Pass)
R	rezistor [Ω]
C	kondenzátor [F]
G	vodivost [S]
Q	činitel jakosti [-]
OZ	operační zesilovač
OTA	operační transkonduktanční zesilovač (operational transconductance amplifier)
BOTA	operační transkonduktanční zesilovač s diferenčním výstupem (balanced output OTA)
UCC	univerzální proudový konvektor (universal current conveyor)
UVC	univerzální napěťový konvektor (universal voltage conveyor)
DCVC	diferenciální napěťový konvektor (differential current voltage conveyor)
DVCC	diferenční proudový konvektor (differential current voltage conveyor)
DDCC	diferenční rozdílový proudový konvektor (differential difference current conveyor)
GCC	obecní proudový konvektor (general current conveyor)
CCI	proudový konvektor první generace
CCII	proudový konvektor druhé generace
CCIII	proudový konvektor třetí generace
Y	vstupní svorka konvektoru
X	vstupní svorka konvektoru
Z+	výstupní svorka konvektoru
Z-	výstupní svorka konvektoru
π	Ludolfovo číslo (3,1415926535 [-])
B	Šířka pásma

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HÁJEK, K a SEDLÁČEK, J. *Kmitočtové filtry*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2002, 535 s. ISBN 80-730-0023-7.
- [2] VRBA, K. *Analogová technika: Vysoké učení technické v Brně*, 2012, ISBN: 978-80-214-4458-4.
- [3] Analogová technika počítačová cvičení úloha 2: *Kmitočtový filtr*. FEKT VUT v Brně
- [4] DOSTÁL, T. *Princip filtrů: Ústav radioelektroniky*, FEKT, VUT v Brně, [online]:<<http://www.google.cz/url>>
- [5] PETRŽELA, J. *Elektrické filtry-fázovací články a kmitočtové korektory*. Ústav radioelektroniky, FEKT, VUT v Brně, [online]. 21. 12. 2009 Dostupné na internetu:<<http://www.urel.feec.vutbr.cz/MTEO/belf/fazovaci20clanky.pdf>>
- [6] SUN, Y. *Design of High Frequency Integrated Analogue Filters*, IET 2002.
- [7] KUBÍK, M. *Diferenční kmitočtové filtry s moderními aktivními prvky*. BRNO, 2011. 74s. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. Jan Jeřábek
- [8] ČAJKA, J.; DOSTÁL, T.; VRBA, K. *Nové názvosloví a sjednocující pohled na proudové konvejory* [online]. Elektronický časopis. Dostupné z URL: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01024/index.html>.
- [9] JEŘÁBEK, J a VRBA, K. *Vybrané vlastnosti univerzálního proudového konveju, ukázka návrhu aplikace*. 2006, roč. 2006, č. 41, s. 9. [online]. Elektronický časopis. Dostupné z: URL <http://www.elektrorevue.cz/cz/clanky/analogova-technika--vzajemny-a-d-prevod/0/vybrane-vlastnosti-univerzalniho-proudoveho-konveju--ukazka-navrhu-aplikace/>
- [10] HORNG, J.W., HOU, CH.L., CHANG, CH.M., CHOU, H.P., LIN, CH.T. *High input impedance voltage-mode universal biquadratic filter with one input an five outputs using current conveyors*. Circuits systems signal processing, Vol. 25, No. 6, 2006, Pp. 767-777. DOI: 10.1007/s00034-005-1227-z

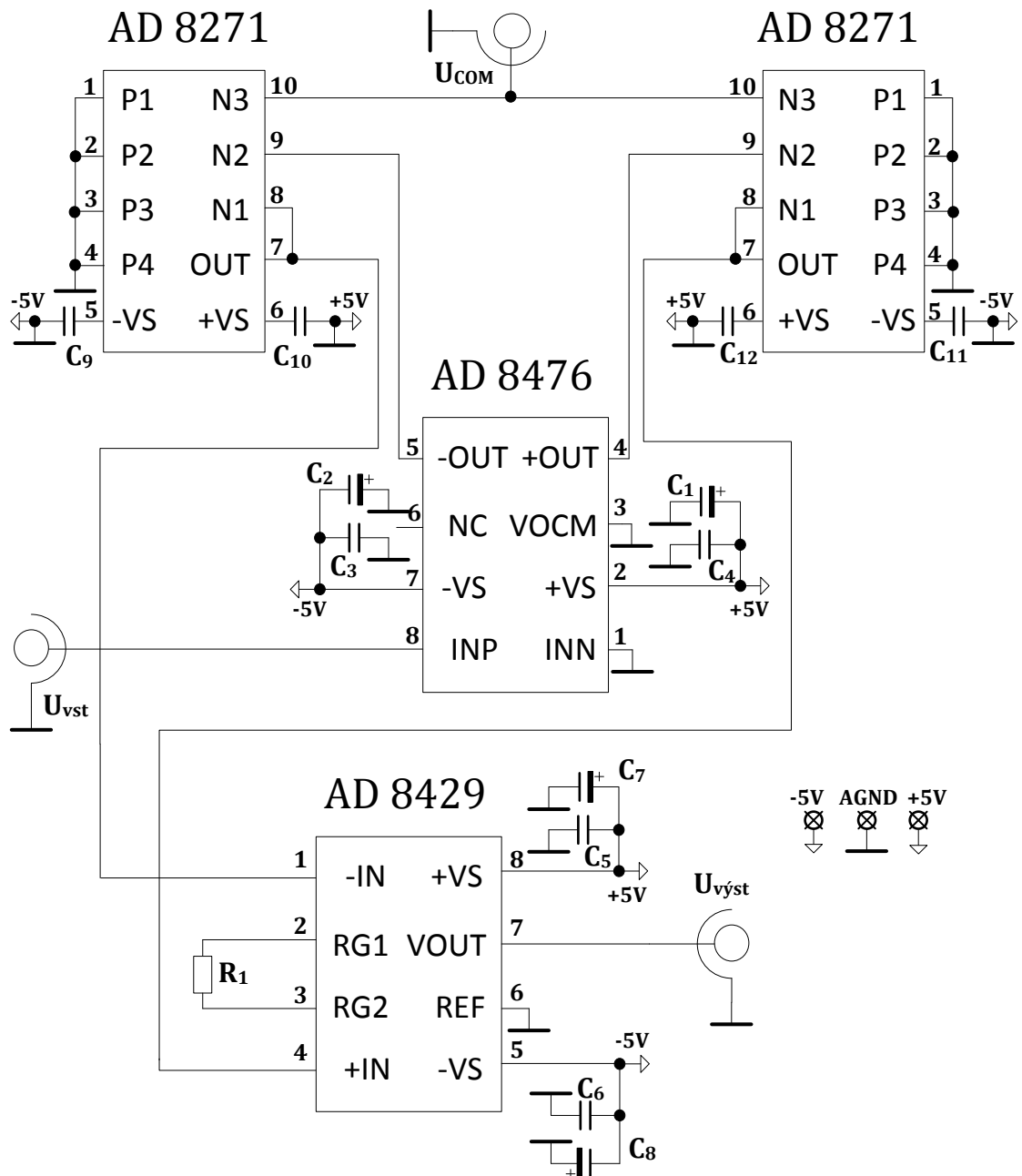
- [11] BEČVÁŘ, D. *Napětové konvejory* [online]. Elektronický časopis. Dostupné z URL: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/01051/index.html>
- [12] KRISHNA, M., KUMAR, NA V., SRINIVASULU, A V. *Differential difference current conveyor based cascadable voltage mode first order all pass filters* ISBN: 978-1-61804-056-5
- [13] KUMNGERN, M., KHATEB, F., PHASUKKIT, P., TUNGJITKUSOLMUN, S., DEJHAN, K. *Voltage-mode multifunction biquadratic filters using new ultra-low-power differential difference current conveyors*. Radioengineering. Vol. 22, No. 2, June 2013.
- [14] JEŘÁBEK, J., KOTON, J., ŠOTNER, R., VRBA, K. Adjustable band-pass filter with current aktive elements: two fully-differential and single-ended solutions. Published online: 28 August 2012. DOI: 10.1007/s10470-012-9942-4
- [15] JEŘÁBEK, J. *Kmitočtové filtry s aktivními prvky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 70 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
- [16] MIŠUREC, J. *Aplikace proudových a napětových konvejer*. Vědecké spisy Vysokého učení technického v Brně. Edice Habilitační a inagurační spisy, sv.232. ISSN 1213-418X.
- [17] KOTON, J., VRBA, K. *Zobecněné metody návrhu kmitočtových filtrů*. Vysoké učení technické v Brně, FEKT. Ústav Telekomunikací.
- [18] CHIU, W.Y.; HORNG, J.W. *Voltage-Mode Highpass, Bandpass, Lowpass and Notch Biquadratic Filters Using Single DDCC*, Radioengineering, Vol. 21., No. 1, 2012, pp. 297-303.
- [19] HORNG, J.W. *Fully differential first-order allpass filters using a DDCC*. Department of Electronic Engineering.
- [20] AD 8476, *Low Power, Unity Gain Fully Differential Amplifier & ADC Driver*. Datasheet, Analog Devices [online]. 2011. Dostupné z URL: http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8476.pdf.

- [21] AD 8429, $1\text{ nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ Low Noise Instrumentation Amplifier. Datasheet, Analog Devices [online] 2011. Dostupné z URL:
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8429.pdf.
- [22] AD 8271, Programmable Gain Precision Difference Amplifier. Datasheet, Analog Devices [online] 2009. Dostupné z URL:
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8271.pdf.
- [23] HORNG, J.W., *Indian Journal of engineering & Materials Sciennes*. Připraveno k publikaci.
- [24] UCC-N1B520, *Universal current conveyor (UCC) and sekond-generation current conveyor (CCII+/-)*

PŘÍLOHA A – PŘEVODNÍK NEDIFERENČNÍHO SIGNÁLU NA DIFERENČNÍ A NAOPAK

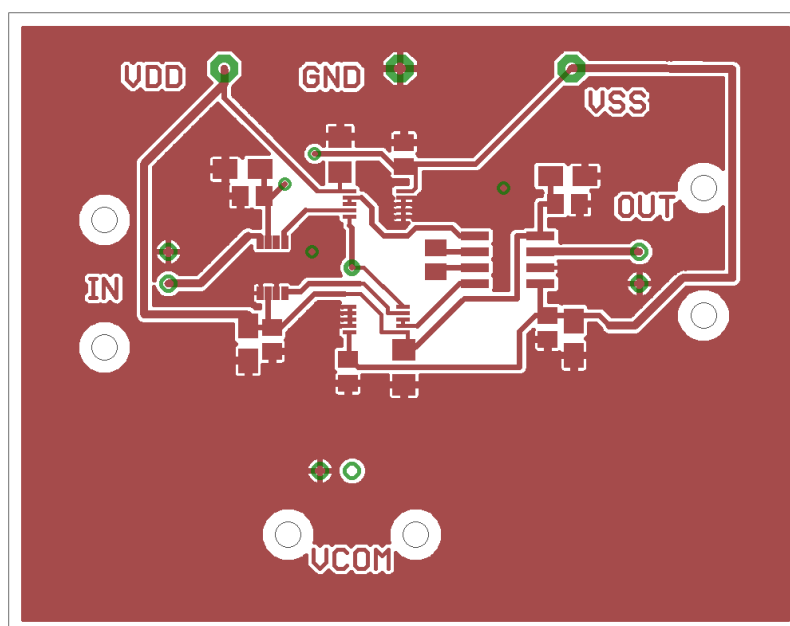
Seznam použitých součástek a návrh desky převodníku nediferenčního signálu na diferenční a naopak

Převodník nediferenčního signálu na diferenční a naopak

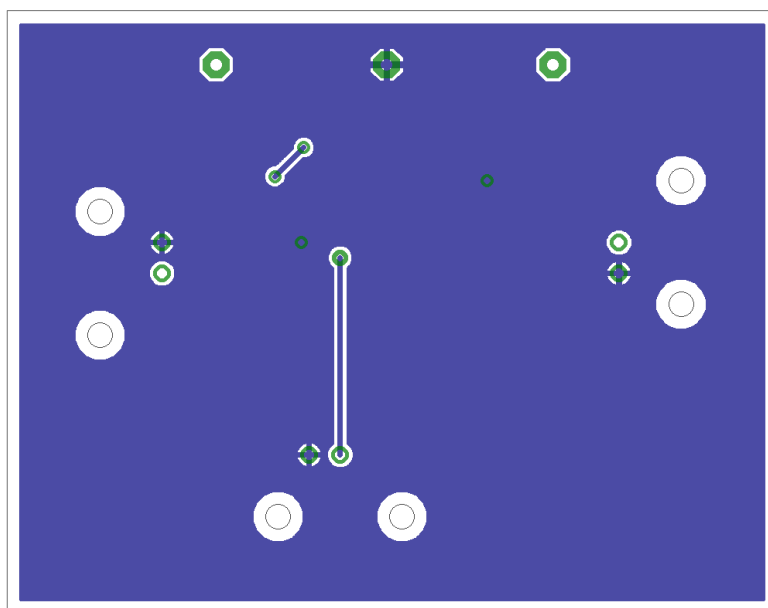


Obr. A.1: Převodník nediferenčního signálu na diferenční a naopak

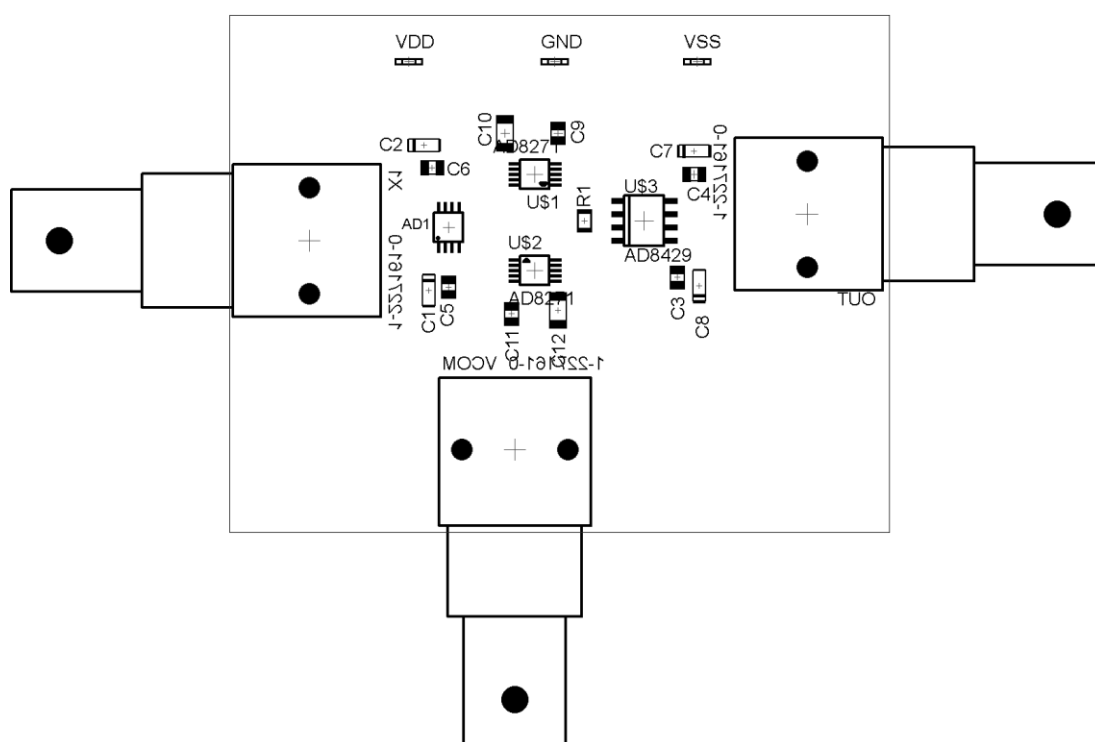
$R_1 = 0\Omega$ (zesílení 1), pokud $R_1 = 6k\Omega$ (zesílení 2)	M0805
$C_1 = 10\mu F$	A/3216-18R
$C_2 = 10\mu F$	A/3216-18R
$C_3 = 0.1\mu F$	M0805
$C_4 = 0.1\mu F$	M0805
$C_5 = 0.1\mu F$	M0805
$C_6 = 0.1\mu F$	M0805
$C_7 = 10\mu F$	A/3216-18R
$C_8 = 10\mu F$	A/3216-18R
$C_9 = 0.1\mu F$	M0805
$C_{10} = 0.1\mu F$	M1206
$C_{11} = 0.1\mu F$	M0805
$C_{12} = 0.1\mu F$	M1206
AD8476	MSOP8
AD8429	SOIC8
AD8271	MSOP10
AD8271	MSOP10



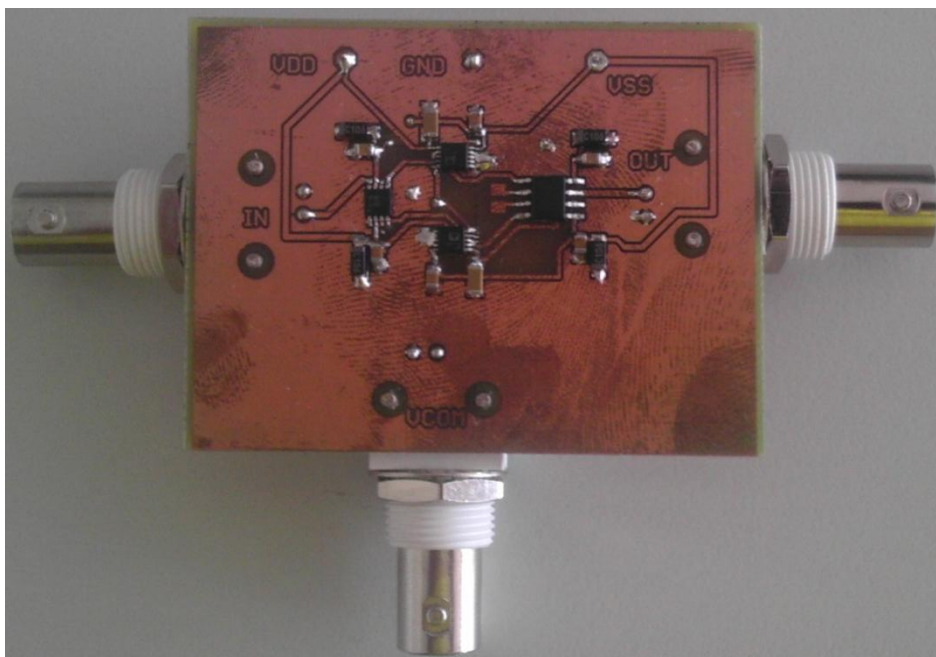
Obr. A.2: Návrh desky plošných spojů (cesty) pohled ze shora



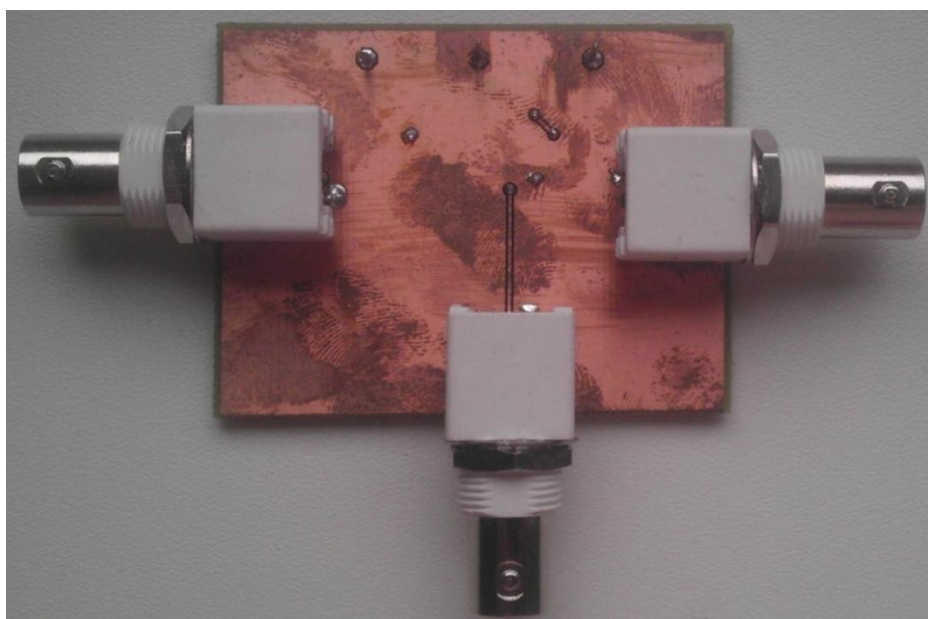
Obr. A.3: Návrh desky plošných spojů (cesty) pohled ze zdola



Obr. A.4: Návrh desky plošných spojů (součástky)



Obr. A.5: Fotografie desky s převodníky pohled ze shora

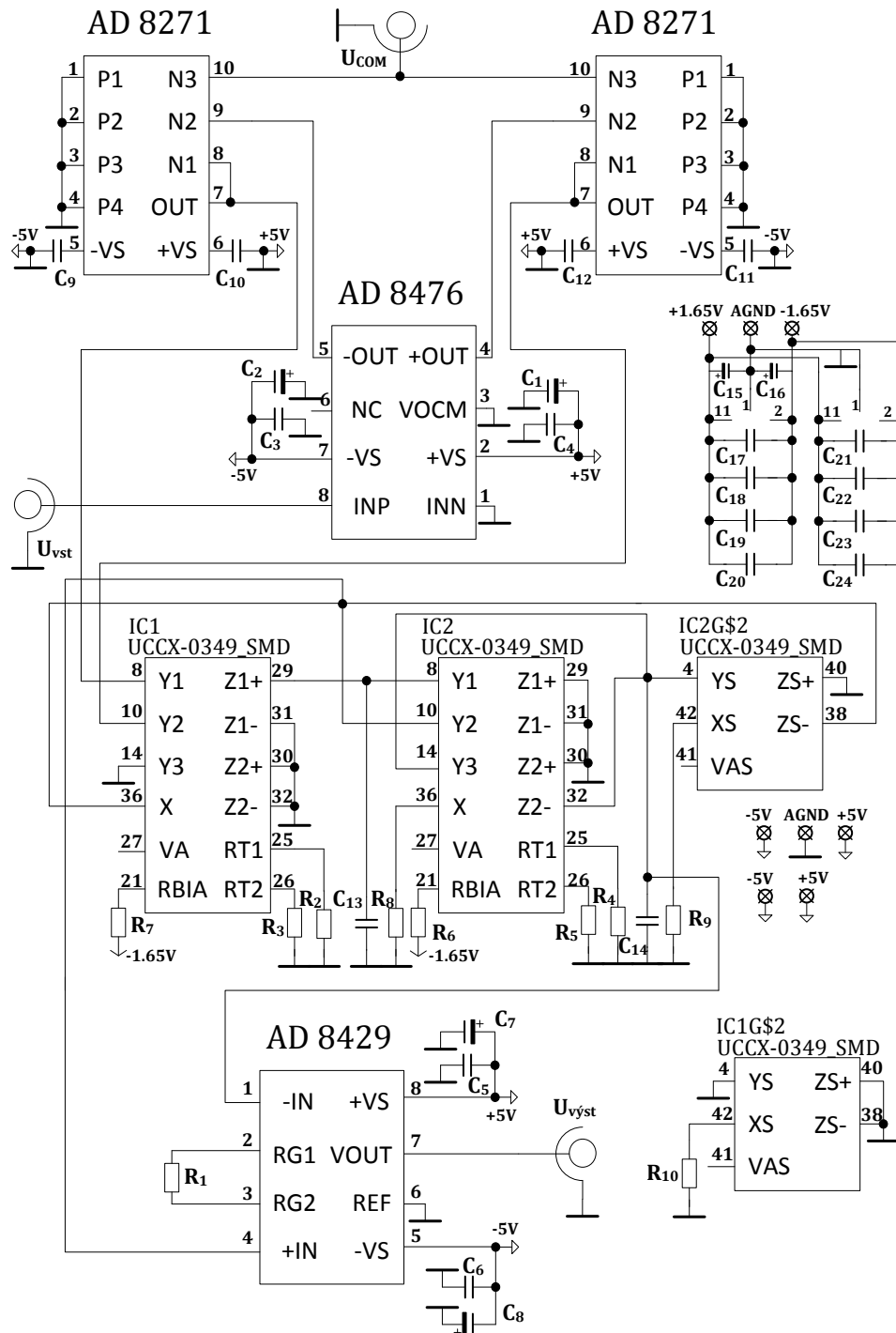


Obr. A.6: Fotografie desky s převodníky pohled ze zdola

PŘÍLOHA B – PROVEDENÍ SYMETRICKÉHO FILTRU SPOLU S PŘEVODNÍKY

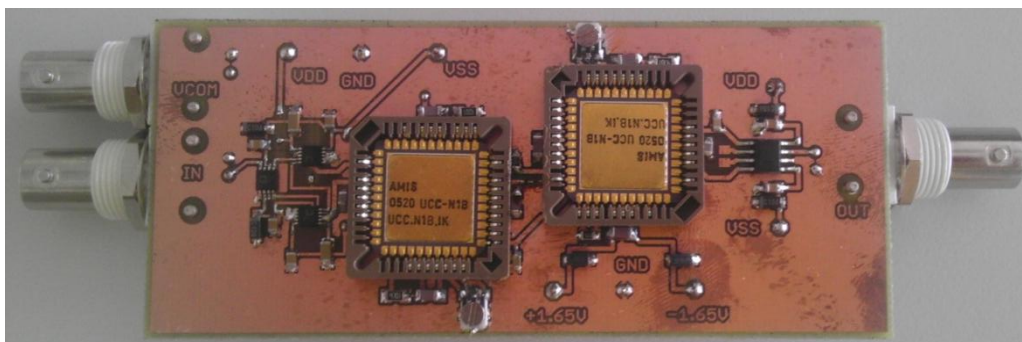
Seznam použitých součástek a návrh desky symetrického filtru spolu s převodníky

Kmitočtový filtr pásmové zadržky spolu s převodníky

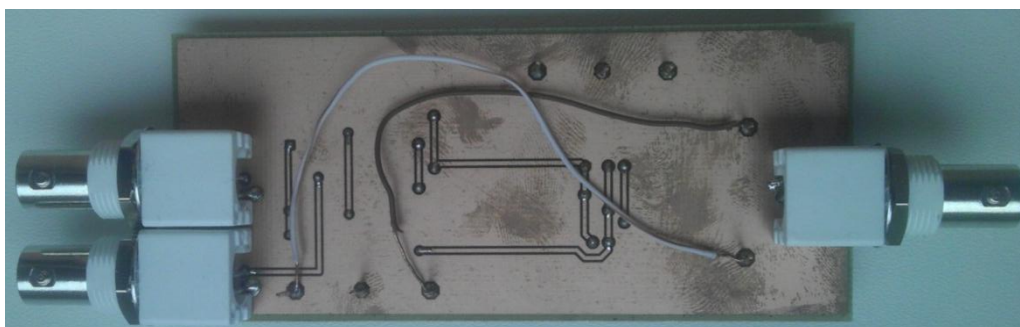


Obr. B.1: Schéma diferenčního filtru pásmové zadržky (PZ)

$R_1 = 0\Omega$ (zesílení 1), pokud $R_1 = 6k\Omega$ (zesílení 2)	M0805
$R_2 = 8.2k\Omega$	M1206
$R_3 = 8.2k\Omega$	M1206
$R_4 = 8.2k\Omega$	M1206
$R_5 = 8.2k\Omega$	M1206
$R_6 = 4.7k\Omega$	M1206
$R_7 = 4.7k\Omega$	M1206
$R_8 = 510\Omega$	M0805
$R_9 = 510\Omega$	M0805
$R_{10} = 1k\Omega$	M1206
$C_1 = 10\mu F$	A/3216-18R
$C_2 = 10\mu F$	A/3216-18R
$C_3 = 0.1\mu F$	M0805
$C_4 = 0.1\mu F$	M0805
$C_5 = 0.1\mu F$	M0805
$C_6 = 0.1\mu F$	M0805
$C_7 = 10\mu F$	A/3216-18R
$C_8 = 10\mu F$	A/3216-18R
$C_9 = 0.1\mu F$	M0805
$C_{10} = 0.1\mu F$	M1206
$C_{11} = 0.1\mu F$	M0805
$C_{12} = 0.1\mu F$	M1206
$C_{13} = 10nF$	M0805
$C_{14} = 10nF$	M0805
$C_{15} = 2.2\mu F$	A/3216-18R
$C_{16} = 2.2\mu F$	A/3216-18R
$C_{17} = 68pF 47nF$	M1206
$C_{18} = 68pF 47nF$	M0805
$C_{19} = 68pF 47nF$	M1206
$C_{20} = 68pF 47nF$	M1206
$C_{21} = 68pF 47nF$	M1206
$C_{22} = 68pF 47nF$	M1206
$C_{23} = 68pF 47nF$	M0805
$C_{24} = 68pF 47nF$	M1206
AD8476	MSOP8
AD8429	SOIC8
AD8271	MSOP10
AD8271	MSOP10



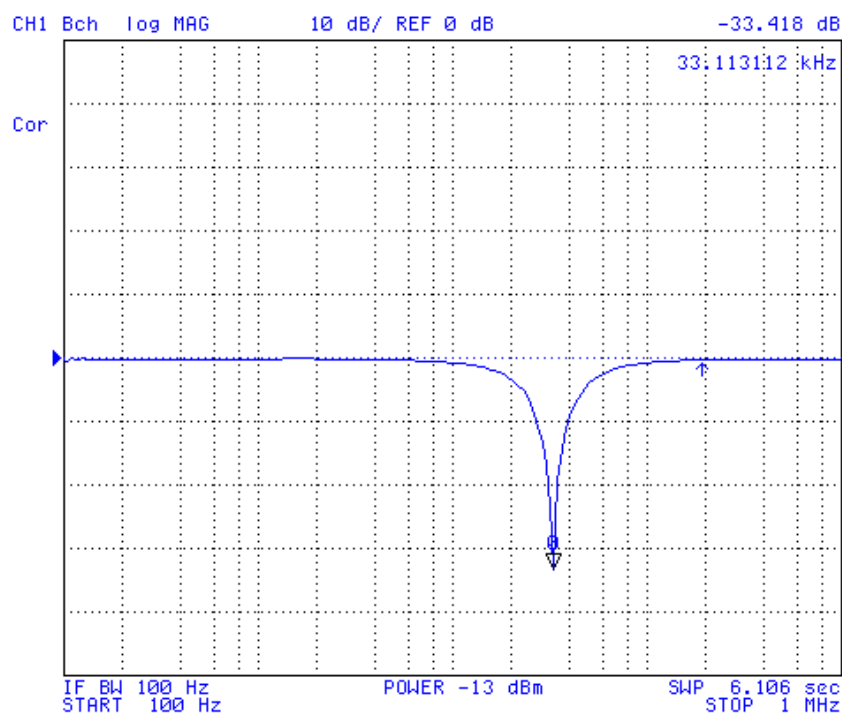
Obr. B.5: Fotografie desky s filtrem (PZ) a převodníky pohled ze shora



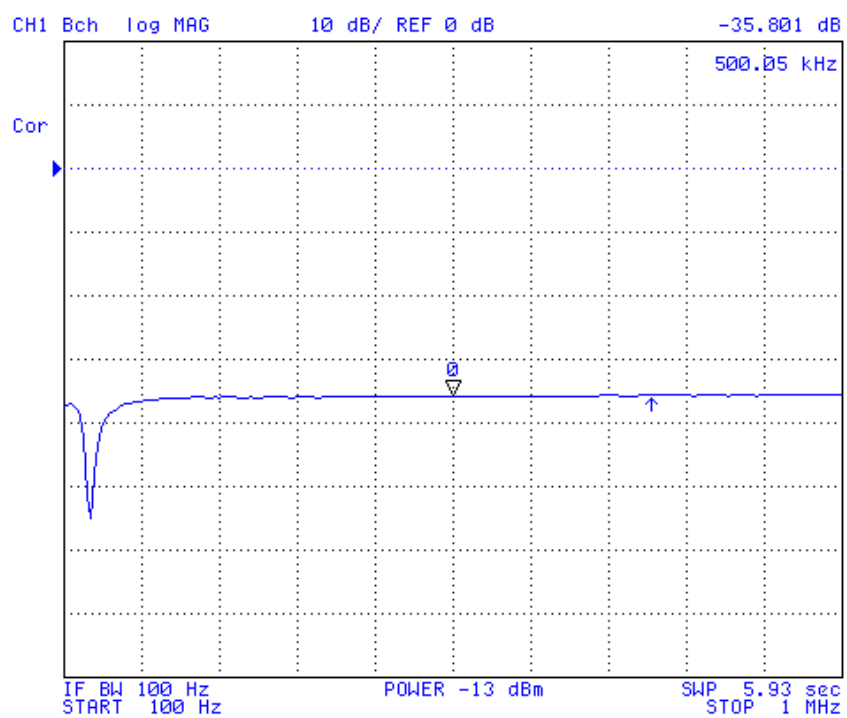
Obr. B.6: Fotografie desky s filtrem (PZ) a převodníky pohled ze zdola

PŘÍLOHA C – ORIGINÁLNÍ VÝSLEDKY MĚŘENÍ ZÍSKANÉ Z OBVODOVÉHO ANALYZÁTORU 4395 A

Originální grafické zobrazení získané praktickým měřením z obvodového analyzátoru 4395A



Obr. C.1: Originální výsledek pásmové zádrže diferenčního filtru z experimentálního měření



Obr. C.2: Originální výsledek diferenční filtru a jeho schopnost potlačit souhlasný signál